

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
CAMPUS DE ARIQUEMES
ENGENHARIA DE ALIMENTOS

SUELLEN DAIANE BARBOSA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES NA INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS**

ARIQUEMES

2014

SUELLEN DAIANE BARBOSA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES NA INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia de Alimentos da
Universidade Federal de Rondônia – UNIR, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Alimentos.

Orientador: Prof. Msc. Gerson Balbueno Bicca

ARIQUEMES

2014

Dados de publicação internacional na publicação (CIP)
Biblioteca setorial 06/UNIR

B238m

Barbosa, Suellen Daiane
Modelagem e simulação de evaporadores na indústria de alimentos. / Suellen Daiane Barbosa. Ariquemes-RO, 2014.
69 f.

Orientador: Prof. Msc. Gerson Balbueno Bicca.

Monografia (Bacharelado em Engenharia de Alimentos)
Fundação Universidade Federal de Rondônia. Departamento de Engenharia de Alimentos, Ariquemes, 2014.

1. EMSO. 2. Evaporadores - alimentos. 3. Suco de laranja. I. Fundação Universidade Federal de Rondônia. II. Título.

CDU: 664.8

Bibliotecária Responsável: Fabiany M. de Andrade, CRB: 11-686.

SUELLEN DAIANE BARBOSA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

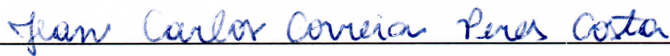
Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenheiro de Alimentos, da Universidade Federal de Rondônia, no dia 10 de Dezembro de 2014 pela Comissão formada pelos professores:

Orientador(a):



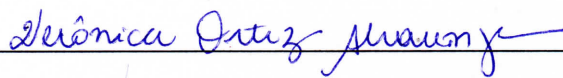
Prof. Me. GERSON BALBUENO BICCA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA



Prof. Me. JEAN CARLOS CORREIA PERES COSTA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA



Prof (a). Me. VERÔNICA ORTIZ ALVARENGA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer em especial à meus pais Laurindo Domingos Barbosa e Joana José Barbosa por todo incentivo, apoio e paciência ao longo de todos estes anos de graduação.

Agradeço também à Simone Diane Barbosa e Márcio dos Santos, por não deixarem que eu desistisse quando as dificuldades apareceram.

Agradeço ao Flávio Sales Silva, por todo suporte e paciência principalmente nesta última etapa da graduação, fazendo com que a execução deste trabalho não fosse tão árdua.

Agradeço ao meu orientador Prof. Msc. Gerson Balbueno Bicca, por toda calma e didática utilizada nas orientações trazendo sempre opiniões de bom senso que auxiliaram por completo na execução deste trabalho.

Agradeço aos colegas de curso, que junto a mim, caminharam e evoluíram ao longo destes anos, contribuindo direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

E por último, porém não menos importante, agradeço a Deus que permitiu mais esta conquista em minha vida.

*Engenharia: onde os nobres semi-hábeis trabalhadores
executam a visão daqueles que imaginam e sonham.
Dr. Sheldon Cooper*

RESUMO

Os sistemas de evaporação são relativamente complexos para simular pois possuem inúmeras possibilidades de arranjos dos efeitos, como por exemplo o tipo de alimentação que pode ser frontal, reversa, mista ou paralela, e também pela possibilidade de adição de acessórios como compressores e termocompressores. O simulador utilizado neste trabalho foi o simulador de processos *EMSO*, que possui licença livre para universidades, é um simulador de fácil manipulação o que permite ao usuário realizar a simulação sem conhecimentos avançados na área de programação. Com os recursos de linguagem de programação objeto orientada disponível no simulador, foi possível a realização das simulações através de modelos matemáticos de produtos alimentícios obtidos pela revisão bibliográfica. Este trabalho teve por objetivo o aprimoramento da biblioteca de evaporadores voltados ao uso na engenharia de alimentos em um simulador de processos. Os modelos foram incorporados à biblioteca de modelos do simulador, e as simulações foram realizadas com um modelo de evaporador genérico. Para validação dos modelos implementados, várias simulações foram realizadas em vários sistemas de evaporação contendo desde um efeito até seis efeitos, com diferentes configurações nos fluxos de alimentação, analisando os parâmetros pré determinados para a produção de suco de laranja concentrado, como temperatura máxima para preservar suas qualidades e o teor de sólidos solúveis desejado ao final do processo de concentração. Os resultados encontrados foram satisfatórios permitindo ao usuário a fácil e rápida visualização dos principais parâmetros que influenciam no sistema de evaporação.

Palavras-chaves: *EMSO*, Evaporadores, Simulação, Suco de laranja.

ABSTRACT

Evaporation systems are relatively complex to simulate because they possess numerous possibilities of arrangements of effects, for example the type of feed which can be front, reverse, mixed or parallel and also the possibility of addition of accessories such as compressors and thermocompressors. The simulator used in this study was the simulation processes *EMSO*, which has free license to universities, is a simulator of easily handled what allows the user to perform the simulation without advanced knowledge in programming. Through the resources of object-oriented programming language available in the simulator, it was possible to perform simulations using mathematical models of food products obtained from the literature review. This work aims to the improvement of the evaporators library directed to the use in food engineering in a process simulator. The models were incorporated into library the models of the simulator, and the simulations were performed with a model of generic evaporator. To validation of the models implemented, several simulations were performed for various evaporation systems containing from one to six effect purposes, with different settings on feed streams, analyzing the pre determined parameters for the production of concentrated orange juice as to preserve maximum temperature their qualities and the soluble solids content desired by the end of the concentration process. The results were satisfactory allowing the user to to quick and easy display the main parameters that influence the evaporation system.

Key-words: *EMSO*, Evaporators, Simulation, Orange juice.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Participação do Brasil na produção e exportação mundial de suco de laranja concentrado, café solúvel e açúcar.	16
Figura 2 – Componentes básicos de um evaporador genérico.	21
Figura 3 – Alimentação frontal.	25
Figura 4 – Alimentação reversa.	26
Figura 5 – Alimentação mista.	27
Figura 6 – Alimentação paralela.	27
Figura 7 – Compressão mecânica.	28
Figura 8 – Compressão térmica.	29
Figura 9 – Diagrama de Dühring para solução de sacarose.	33
Figura 10 – Diagrama de Dühring para o suco de laranja.	34
Figura 11 – Diagrama de Dühring para o suco de maçã.	35
Figura 12 – Diagrama de Dühring para o suco de abacaxi.	36
Figura 13 – Diagrama de Dühring para o suco de limão.	37
Figura 14 – Interface gráfica do simulador <i>EMSO</i>	43
Figura 15 – Guia <i>Explorer</i>	44
Figura 16 – <i>Palette</i> com os ícones para inclusão do sistema de evaporação.	44
Figura 17 – Conexões das linhas de corrente para criação do sistema de evaporação.	45
Figura 18 – Janela para especificações das propriedades do líquido de alimentação.	45
Figura 19 – Janela para especificações das propriedades do vapor de aquecimento.	46
Figura 20 – Janela das propriedades do evaporador.	46
Figura 21 – Botão para início da simulação.	47
Figura 22 – Resultados da Simulação.	47
Figura 23 – Resultados da Simulação na planilha <i>Calc</i> do LibreOffice.	48
Figura 24 – Representação gráfica de um evaporador de efeito simples.	50
Figura 25 – Representação gráfica de um sistema de evaporação com dois efeitos.	51
Figura 26 – Representação gráfica de um sistema de evaporação triplo com alimentação frontal.	52
Figura 27 – Representação gráfica de um sistema de evaporação triplo com alimentação reversa.	54
Figura 28 – Representação gráfica de um sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação reversa.	55
Figura 29 – Representação gráfica de um sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação frontal.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da simulação: Evaporador de efeito simples.	51
Tabela 2 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação com dois efeitos.	52
Tabela 3 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação triplo efeito com alimentação frontal.	53
Tabela 4 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação triplo com alimentação reversa.	54
Tabela 5 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação reversa.	56
Tabela 6 – Resultados da simulação: sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação frontal.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMSO	<i>Environment for Modeling, Simulation and Optimization</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
TASTE	<i>Thermally Accelerated Short Time Evaporator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de troca térmica, (m ²)
α	Constante para equação de elevação do ponto de ebulição (adimensional)
B	Teor de sólidos solúveis, (adimensional)
β	Constante para equação de elevação do ponto de ebulição (adimensional)
C_p	Calor específico, (kJ/kg·°C)
C_{p_a}	Calor específico do líquido de alimentação, (kJ/kg·°C)
ΔT	Diferença de temperatura, (°C)
ΔT_b	Elevação do ponto de ebulição, (°C)
γ	Constante para equação de elevação do ponto de ebulição (adimensional)
h	Entalpia, (kJ/kg)
h_0	Entalpia de referência do líquido, (kJ/kg)
m	Constante para equação de elevação do ponto de ebulição (adimensional)
m_f	Vazão mássica do líquido de Alimentação, (kg/h)
m_p	Vazão mássica do produto concentrado, (kg/h)
m_u	Vazão mássica do vapor utilizado, (kg/h)
m_v	Vazão mássica de massa do vapor produzido, (kg/h)
P	Pressão, (kPa)
Q	Taxa de transferência de calor, (kW)
σ	Constante para equação de elevação do ponto de ebulição (adimensional)
T_0	Temperatura de referência, (°C)
T	Temperatura, (°C)
T_{ebu}	Temperatura de ebulição do produto, (°C)
T_i	Temperatura inicial de alimentação, (°C)
U	Coeficiente global de troca térmica, (kW/m ² ·K)

X_f	Fração de sólidos no líquido de alimentação, (adimensional)
X_p	Fração de sólidos no produto, (adimensional)
λ_v	Calor latente de vaporização, (kJ/kg)

LISTA DE CÓDIGOS

Código 3.1 – Model de um evaporador.	40
Código 3.2 – FlowSheet para a simulação do modelo de evaporador.	41
Código A.1 – Modelo de corrente de processo.	64
Código A.2 – Modelo do evaporador genérico.	64

SUMÁRIO

1	Introdução	16
1.1	Estrutura do Trabalho	17
1.2	Motivação	18
1.3	Objetivos	18
2	Revisão Bibliográfica	20
2.1	Evaporadores	20
2.1.1	Classificação e Tipos de evaporadores	20
2.2	Métodos de economia do vapor	24
2.2.1	Utilização de evaporadores de múltiplos efeitos	24
2.2.2	Reutilização de Vapor	28
2.3	Modelagem Matemática em Regime Permanente	29
2.3.1	Balanço de Massa	29
2.3.2	Balanço de Energia	30
2.3.3	Coeficiente global de transferência de calor	30
2.4	Propriedades termo físicas	31
2.4.1	Entalpia e Calor específico	31
2.4.2	Elevação do ponto de ebulição	31
3	Simulação e Modelagem Matemática	38
3.1	Simuladores de Processos	38
3.2	<i>EMSO</i>	39
3.2.1	Características do <i>EMSO</i>	39
4	Implementação da Biblioteca no Simulador	43
4.1	Interface Gráfica ao Usuário	43
4.1.1	Corrente de Alimentação	45
4.1.2	Corrente do vapor de aquecimento	45
4.1.3	Evaporador	46
5	Simulação de Evaporadores em Regime Permanente	49
5.1	Suco de laranja	49
5.1.1	Evaporador com um efeito simples	50
5.1.2	Evaporador com efeito duplo com alimentação frontal	51
5.1.3	Evaporador com efeito triplo com alimentação frontal	52
5.1.4	Evaporador com efeito triplo com alimentação reversa	53
5.1.5	Evaporador de múltiplo efeito com alimentação reversa	55
5.1.6	Evaporador de múltiplo efeito com alimentação frontal	56
6	Conclusão	59
	Referências	61

Apêndices	63
APÊNDICE A Modelos da Biblioteca de Evaporadores	64

1 INTRODUÇÃO

A operação unitária de evaporação tem como finalidade a separação e/ou concentração de alguns componentes específicos do alimento pelo uso do calor, agregando valor ao produto final e conservando-o por mais tempo pela diminuição da atividade de água (FELLOWS, 2006).

Segundo Brandão e Teixeira (1985), o modo de operação dos evaporadores industriais podem ocorrer de forma contínua ou semicontínua. Na indústria de alimentos, os modos mais utilizados são os sistemas contínuos por diversos motivos, tais como, maior rendimento energético, maior controle, menor espaço requerido para uma determinada vazão, menor mão-de-obra envolvida no processo, entre outros.

De acordo com dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2010), no ano de 2010, o Brasil teve significativa participação na produção e exportação mundial de suco de laranja, café solúvel e açúcar, como pode ser observado na Figura 1. Esses produtos têm em comum em sua produção o uso de evaporadores industriais.



Figura 1 – Participação do Brasil na produção e exportação mundial de suco de laranja concentrado, café solúvel e açúcar.

Fonte: MAPA (2010).

Com o crescimento da produção e exportação de alimentos que necessitam de sistemas de evaporadores em sua produção, torna-se necessário o desenvolvimento de novos processos e o estudo de melhorias que possam contribuir para a otimização dos processos já existentes.

De acordo com Avalo e Varela (2008), o processo de concentração por evaporação pode ser representado através da utilização da modelagem matemática. Contudo, a maioria das ferramentas utilizadas para a modelagem matemática e disponíveis no mercado, exigem

um alto nível de conhecimento em alguma linguagem de programação, o que em muitos casos torna o seu uso proibitivo devido ao tempo que deve ser considerado para realizar tal tarefa (SOARES, 2003).

Segundo Chawankul et al. (2001), muitas aplicações das ferramentas de simulação de processos são encontradas voltadas aos processos químicos industriais, porém há poucos estudos que são voltados para a modelagem e simulação de processos da indústria de alimentos.

No trabalho de Westphlen (1999), o autor mostra que um processo de evaporação contendo 10 efeitos, por exemplo, pode ser descrito por 10 equações de balanço de massa de sólidos, 10 equações de balanço de massa total e 10 equações de balanço de energia, totalizando 30 equações.

Essa aparente simplicidade dos sistemas de evaporação é rapidamente desfeita com uma análise mais detalhada desta operação unitária, devido as inúmeras possibilidades de configurações dos efeitos em termos de fluxo de líquido e vapor, inclusão de acessórios como compressores, bombas e condensadores. A simulação de um evaporador de suco de laranja, por exemplo, pode possuir até nove efeitos, gerando algo em torno de 362 880 alternativas de configuração possível (WISCHRAL; PRAXEDES; SANTOS, 2009).

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, arranjados da seguinte forma:

No Capítulo 1 (este Capítulo) são apresentadas as justificativas e os objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2, é realizada a revisão bibliográfica acerca da operação unitária de evaporação. Uma descrição geral dos principais tipos e configurações de evaporadores são apresentadas. A revisão bibliográfica apresenta ainda o equacionamento geral de um sistema de evaporação e as principais propriedades termo físicas empregadas para descrever tal sistema.

O Capítulo 3, discorre sobre a modelagem e a simulação matemática, apresentando os dois principais grupos em que os simuladores existentes são divididos. Ainda no Capítulo 3, é apresentado o *Software EMSO* e suas principais características.

No Capítulo 4, é apresentada a implementação da biblioteca voltada para área de Engenharia de Alimentos e a interface gráfica do simulador.

No Capítulo 5, são apresentados os testes de simulações com o modelo desenvolvido, evidenciando assim o uso da biblioteca de modelos como ferramenta de simulação.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões, juntamente com sugestões para o aperfeiçoamento e extensão dos modelos.

1.2 MOTIVAÇÃO

Grande parte dos estudos voltados à operação unitária de evaporação são realizadas com o auxílio de *softwares* proprietários que possuem um custo elevado para a obtenção de suas licenças. Esses *softwares* muitas vezes são descritos como estruturas do tipo 'caixa preta', o que significa que o domínio da tecnologia é restrita aos seus fabricantes, tornando-se assim um empecilho tanto para o uso industrial quanto para o desenvolvimento de trabalhos acadêmicos. Além disso, a indústria brasileira ainda carece de ferramentas de simulação alternativas e de código aberto para a realização destes estudos (SOARES, 2003).

Somado a esse fato, o uso de simuladores de processos têm se tornado cada vez mais frequente, tanto em indústrias quanto em instituições de ensino. Além disso, o seu uso em sala de aula torna o aprendizado mais dinâmico e construtivo (RODRIGUES et al., 2006).

Em se tratando da operação unitária de evaporação e considerando o exposto acima, percebe-se que existe espaço para a utilização da modelagem matemática para a descrição dos processos de evaporação, desde que se tenha uma ferramenta disponível e adequada que possa suprimir as deficiências apresentadas.

1.3 OBJETIVOS

O *software* utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é o simulador de processos *EMSO* (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*)

Designada a ferramenta a ser utilizada, o presente trabalho teve como objetivo, o aprimoramento da biblioteca de evaporadores presentes no simulador *EMSO*, com o intuito de estender os modelos matemáticos existentes para que seja possível a simulação dos processos de evaporação em regime permanente e de interesse da engenharia de alimentos.

Para que o objetivo geral seja alcançado, serão realizadas as seguintes etapas:

- ✓ Efetuar uma revisão bibliográfica acerca da modelagem matemática de evaporadores utilizados na indústria de alimentos, incluindo os principais tipos de equipamentos e arranjos típicos de evaporadores;
- ✓ Revisar e compilar as principais correlações e propriedades físicas dos componentes envolvidos para simular sistemas de evaporação;
- ✓ Exemplificar de uma maneira geral o uso da biblioteca de modelos através da simulação de sistemas típicos de evaporadores;
- ✓ Aprimorar e estender a biblioteca de modelos existente para que seja possível:
 - ✓ Obter uma interface gráfica amigável, simples e intuitiva ao usuário final;

- ✓ Solucionar a maioria dos problemas relacionados à operação unitária de evaporação em regime permanente, tanto em sistemas de evaporadores simples até aos de múltiplos efeitos.
- ✓ Propor sugestões para que a biblioteca implantada possa ter continuidade de aperfeiçoamento e extensão dos modelos existentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVAPORADORES

A evaporação é uma operação unitária que tem como finalidade a separação e/ou concentração de alguns componentes específicos do alimento pelo uso do calor para agregar valor ao produto final conservando-o por mais tempo através da diminuição da atividade de água (FELLOWS, 2006; ROGERIO; COSTA; JUNIOR, 2013).

O princípio da operação de evaporação consiste na concentração de sólidos de uma solução realizada pela ebulição e liberação do vapor d'água através do emprego de calor, a fonte de calor é sempre indireta (WESTPHLEN, 1999).

No decorrer do processo de evaporação, ocorre a transferência de calor sensível do vapor para o líquido a ser evaporado. Este processo tem a finalidade de elevar a temperatura da solução até atingir o seu ponto de ebulição. Para atingir este ponto, o calor latente de vaporização é fornecido pelo vapor para formar bolhas de vapor na superfície do líquido a ser evaporado deixando-o em estado de ebulição (FELLOWS, 2006).

Na indústria de alimentos os sistemas de evaporação necessitam ser cuidadosamente projetados para evitar alterações indesejáveis aos alimentos, tais como: perda de aromas, escurecimento devido a reações de *Maillard*, gelatinização de amidos, desnaturação de proteínas, e degradação de nutrientes como vitaminas, que normalmente ocorrem quando um alimento é aquecido até a temperatura de ebulição normal da água.

Para se evitar a ocorrência destes efeitos normalmente são utilizadas duas estratégias: o uso de vácuo (para que a ebulição da água ocorra em temperaturas menores, sendo assim menos prejudiciais ao alimento) e o uso de equipamentos que permitam um pequeno tempo de residência (para minimizar o tempo no qual o alimento se encontra em temperaturas danosas) (WESTPHLEN, 1999).

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE EVAPORADORES

Os sistemas de operação dos evaporadores podem ocorrer em três formas:

- **Sistemas Contínuos:** Evaporadores cujo o fluxo de entrada e saída operam de forma ininterrupta;
- **Sistemas Semicontínuos:** Evaporadores cujo um dos fluxos (entrada ou saída) operam de maneira contínua e o outro no sistema de bateladas;
- **Sistemas 'Batch':** Evaporadores que operam por batelada.

Na indústria de alimento, os sistemas mais utilizados são os sistemas contínuos por diversos motivos, tais como maior rendimento energético, maior controle, menor espaço requerido para uma determinada vazão e menor mão-de-obra envolvida no processo (BRANDÃO; TEIXEIRA, 1985).

Brandão e Teixeira (1985) descrevem que em geral os evaporadores são compostos por quatro componentes básicos, conforme apresentados na Figura 2.

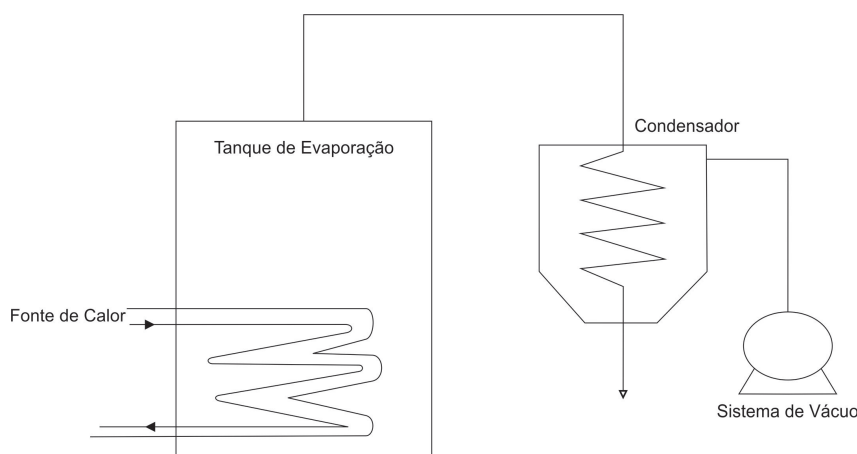


Figura 2 – Componentes básicos de um evaporador genérico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

- ➡ No tanque de evaporação é onde ocorre a ebulição do líquido a ser evaporado;
- ➡ O trocador de calor (calandra) é o responsável por transferir o calor do vapor d'água para o líquido a ser evaporado;
- ➡ O condensador também é um trocador de calor que tem a finalidade de separar o vapor produzido;
- ➡ Para a manutenção do vácuo, o sistema designado opera removendo os gases não condensáveis, geralmente é composto por uma bomba de vácuo mecânica ou ejetora de vapor.

Quanto aos tipos de evaporadores, existem diversas bibliografias (Fellows (2006), Brandão e Teixeira (1985), Foust et al. (2011)) que apresentam e descrevem os principais tipos de evaporadores. Estes são resumidamente descritos abaixo:

- ➡ **Evaporadores de tacho aberto ou fechado:** É um dos processos mais antigos de concentração, utilizado até hoje para a fabricação de doces e geleias. Consiste de um tacho hemisférico que é aquecido diretamente por gás ou por energia elétrica, ou indiretamente por vapor que passa em tubos internos ou camisas, geralmente é adicionado ao

tacho um agitador central ou tipo raspador para aumentar a taxa de transferência de calor por convecção forçada e evitar que o produto fique depositado nas paredes do tacho causando um superaquecimento e promovendo sabores e odores indesejáveis. São pouco eficientes, pois têm uma taxa de transferência de calor relativamente baixa, porém esses evaporadores são de fácil construção e manutenção, tendo um baixo custo de investimento.

■ **Evaporadores de tubo curto:** Consiste de uma carcaça que contém um conjunto de tubos na maioria das vezes vertical que promove correntes de convecção naturais, consequentemente maiores taxas de transferência de calor. Possuem baixo custo de construção e manutenção, e normalmente não são apropriados para produtos com alta viscosidade, pois há circulação deficiente e alto risco de queima dos alimentos. O líquido a ser evaporado entra no evaporador e é aquecido pela condensação do vapor d'água que envolve os tubos, o líquido então atinge o ponto de ebulição e ascende pelos tubos, logo após o líquido recircula por um tubo central de fluxo descendente. Esses evaporadores podem conter um tubo externo para a recirculação do produto (calandra), que aumenta as correntes de convecção e as taxas de transferência de calor, além de ser mais facilmente acessível para a limpeza.

■ **Evaporadores de tubo longo:** Os evaporadores de tubo longo são caracterizados por altas taxas de transferência de calor e uso eficiente de energia, consistem de um conjunto de tubos que são dispostos dentro de uma carcaça de vapor que pode ter até 15 metros de altura. O líquido a ser evaporado passa por um aquecimento até quase atingir o ponto de fervura antes de entrar no evaporador, então o líquido entra no evaporador, onde vai ser aquecido dentro dos tubos até atingir o ponto de ebulição, a expansão do vapor força a subida de uma fina película de produto altamente concentrado pelas paredes de cada tubo, o produto então é separado do vapor e removido do evaporador. O vapor obtido deste sistema pode ser reutilizado em sistemas de múltiplos efeitos ou de recompensação de vapor. Esses evaporadores podem ser divididos em duas categorias: Película ascendente e Película descendente:

- **Película ascendente:** usada para alimentos com baixa viscosidade, como o leite por exemplo, a alimentação deste evaporador é realizada pela parte inferior dos tubos, a fina película de líquido é forçada para cima pelos tubos do evaporador.
- **Película descendente:** são os mais utilizados na indústria de alimentos, pois o baixo tempo de residência (normalmente de 5 a 30 segundos) minimiza os danos ao produto alimentício. A alimentação deste evaporador é realizada pela parte superior dos tubos. O vapor condensa na superfície externa de tubos verticais. Nas indústrias de sucos cítricos são empregados equipamentos denominados TASTE (*"Thermally Accelerated Short Time*

Evaporator") que se destacam pelo sistema de distribuição uniforme de líquido pelos tubos do equipamento através da geração, por redução abrupta de pressão, de uma mistura de vapor e pequenas gotículas de líquido.

- **Evaporadores de placas:** Assim como os trocadores de calor de placas, quando comparados com trocadores convencionais tipo casco-tubo, apresentam uma série de vantagens (altas velocidades de escoamento que geram altos coeficientes de troca térmica, pequenas áreas de instalação, facilidade de limpeza, ausência de pontos mortos onde podem ocorrer acúmulos de material, curto tempo de permanência) os evaporadores de placas também apresentam as vantagens acima mencionadas, quando comparados aos outros tipos de equipamentos de evaporação. O líquido é concentrado ao passar nos espaços entre as placas, o número de placas existentes no equipamento depende da taxa de produção e do grau de concentração desejado. A mistura de produto concentrado e vapor são separados fora do evaporador. Este evaporador é indicado para produtos lácteos, sucos de frutas, e bebidas com baixo teor alcoólico.
- **Evaporadores de fluxo expandido:** Os evaporadores de fluxo expandido utilizam basicamente os mesmos princípios dos evaporadores de placa, porém utilizando uma série de cones invertidos ao invés das placas. O líquido a ser evaporado flui de um eixo central para espaços alternados entre os cones e evapora à medida que passa pelos canais de fluxo com área cada vez maior. O vapor d'água passa de cima para baixo em canais alternados. A mistura de concentrado e vapor deixa o conjunto de cones e é separada em uma carcaça com design especial que induz um efeito de ciclone. As vantagens desse evaporador consistem em: curto tempo de permanência, alto grau de flexibilidade pela mudança no número de cones e é um equipamento relativamente compacto.
- **Evaporadores de superfície raspada:** Os evaporadores mecânicos de superfície raspada demandam um alto custo de operação, pois aceitam apenas um estágio de processamento, ocasionando também um alto consumo de vapor d'água. Devido a esses fatores o uso deste evaporador é voltado para a finalização do processo de evaporação de alimentos com alta viscosidade e alimentos que podem formar espumas, como por exemplo, polpas e sucos de frutas, massa de tomate, mel, massa de cacau, café e produtos lácteos. Os evaporadores consistem em uma camisa de vapor que envolve um rotor de alta velocidade, onde são acopladas lâminas curtas ao longo de todo o seu comprimento. O líquido a ser evaporado é introduzido entre o rotor e a superfície aquecida, e a evaporação ocorre rapidamente enquanto uma película fina do líquido é arrastada ao longo do evaporador pelas lâminas do rotor, essas lâminas mantêm a película violentamente agitada, promovendo altas taxas de transferência de calor, e evitando a queima do produto na superfície quente.

- **Evaporadores *Centri-therm*:** Os evaporadores *Centri-therm* são um modelo de evaporadores mecânicos, esse modelo tem aparência similar aos evaporadores de fluxo expandido, porém operam em princípios diferentes. No evaporador de fluxo expandido o líquido é movido pela pressão de vapor, já no evaporador *Centri-therm* a força para movimentação do líquido é a força centrífuga. O líquido é alimentado por um tubo central para os lados inferiores de cones ociosos giratórios, imediatamente o líquido se espalha formando uma fina película com cerca de 0,1 mm de espessura. O vapor d'água é condensado no outro lado de cada cone e rapidamente evapora o líquido. O produto produzido por este equipamento quando diluído novamente, tem qualidades nutricionais e sensoriais quase idênticas às do produto original, este evaporador é utilizado para produção de chás, cafés e enzimas usadas no processamento de alimentos.

2.2 MÉTODOS DE ECONOMIA DO VAPOR

Os evaporadores comuns têm um grande consumo de energia térmica, fazendo com que o custo principal do processo seja o do vapor de água consumido. Tendo em vista isso, várias estratégias de economia de energia são empregadas com o intuito de se obter um menor custo no processo, como por exemplo, o uso de evaporadores de múltiplos efeitos e a reutilização do vapor (FOUST et al., 2011).

A economia de vapor é uma medida do gasto térmico, consequentemente da eficiência térmica de um evaporador. Um evaporador ideal deveria utilizar 1 kg de vapor para vaporizar 1 kg de água, porém o processo é limitado por perdas de calor do sistema. Através do uso de arranjos especiais, é possível aproveitar a energia do vapor produzido, podendo-se aumentar a massa de água evaporada. Para determinar a economia de vapor de um sistema de evaporação é utilizada a Equação 2.1 (BRANDÃO; TEIXEIRA, 1985).

$$\text{Economia} = \frac{\text{massa (kg) de água evaporada}}{\text{massa (kg) do vapor utilizado}} \quad (2.1)$$

2.2.1 UTILIZAÇÃO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS EFEITOS

O método geral para aumentar a eficiência térmica de um sistema de evaporação, é a utilização de uma série de evaporadores entre o fornecimento inicial do vapor e o condensador. Esse sistema é chamado de evaporação de múltiplo efeito (GALINA, 2010).

Os evaporadores de múltiplos efeitos têm como princípio a divisão da evaporação em diversos corpos de equipamento, que são denominados como efeitos ou estágios. É utilizada a água evaporada de um efeito como meio de aquecimento do efeito seguinte. Desta forma, o vapor vivo é utilizado apenas no primeiro efeito, enquanto que para os demais efeitos utiliza-se vapor vegetal, logo, a temperatura de ebulição do líquido de alimentação no segundo evaporador deve ser mais baixa para permitir que o vapor vegetal produzido no

primeiro evaporador se condense no segundo, liberando o seu calor latente de condensação. Pode-se afirmar que o consumo de vapor de um sistema de evaporação em múltiplos efeitos é dado pelo consumo de vapor de um sistema de evaporação com único efeito dividido pelo número de efeitos (FOUST et al., 2011; GALINA, 2010).

A escolha do número de efeitos é sempre baseada em critérios econômicos, quanto maior o número de efeitos menor será o consumo de vapor de aquecimento e, portanto, menor será o custo relativo ao consumo de energia. Por outro lado, quanto maior o número de efeitos menor serão as diferenças de temperatura empregadas como força motriz para transferência de calor em cada efeito e, portanto, maior será a área de troca térmica requerida para a construção do evaporador (WESTPHLEN, 1999).

O uso de múltiplos efeitos podem ocorrer de quatro possíveis arranjos em função dos fluxos de vapor e líquido e que são classificados em:

- Alimentação frontal;
- Alimentação reversa;
- Alimentação mista;
- Alimentação paralela.

A Figura 3 apresenta o esquema dos sistemas de evaporação com alimentação frontal, onde o fluxo do líquido a ser evaporado é alimentado no mesmo sentido que o vapor vivo.

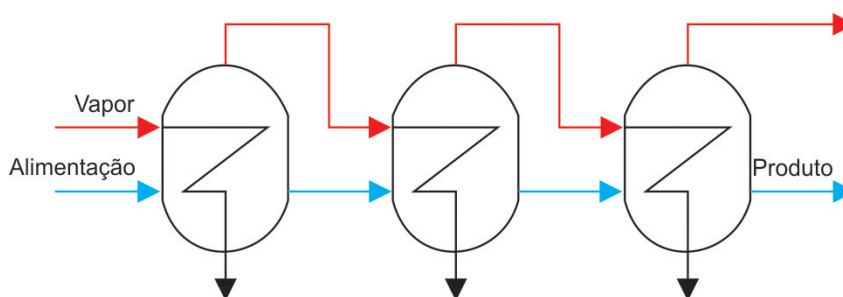


Figura 3 – Alimentação frontal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse arranjo tem como principais características:

- O fluxo de líquido sempre se dá no sentido decrescente de pressões, o que para fluidos pouco viscosos dispensa o uso de bombas para o escoamento entre os efeitos;
- O produto concentrado é sujeito à temperatura mais baixas, pois estas encontram-se nos efeitos de menor pressão. As temperaturas baixas podem ser úteis para minimizar

os efeitos indesejáveis como por exemplo, impedir a decomposição de compostos orgânicos, evitar sabor e odor característico de produto queimado;

- Possui uma baixa economia de vapor, pois todo o aquecimento de carga é efetuado no primeiro efeito, de modo que neste estágio a quantidade de vapor gerada pelo vapor de água de aquecimento é menor (FOUST et al., 2011).

A Figura 4 apresenta o esquema dos sistemas de evaporação com alimentação reversa, onde o líquido a ser evaporado é alimentado no último efeito com relação ao fluxo de vapor, de maneira contracorrente.

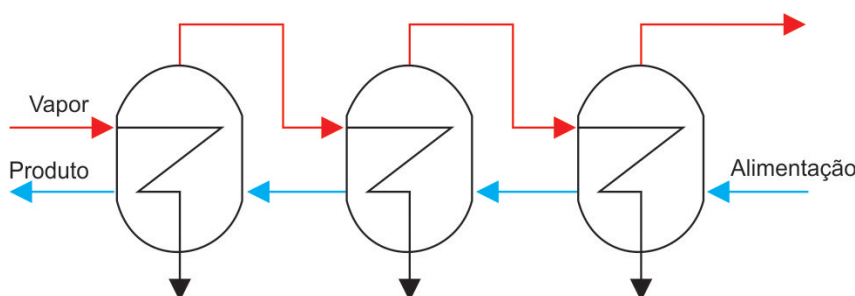


Figura 4 – Alimentação reversa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse arranjo tem como características:

- O fluxo de líquido se dá no sentido crescente de pressões exigindo o uso de bombas para permitir seu escoamento;
- Possui uma melhor economia quando comparado aos sistemas de alimentação frontal, pois o produto está aquecido na entrada de cada efeito;
- O produto concentrado deixa o evaporador no efeito de maior temperatura e por esta razão essa configuração não é recomendada para produtos alimentícios, pois neste efeito podem ocorrer grandes danos ao alimento, como degradação dos compostos orgânicos (FOUST et al., 2011)

A Figura 5 apresenta o esquema dos sistemas de evaporação com alimentação mista, este sistema não possui um arranjo típico. Um evaporador com alimentação mista é aquele no qual não há divisão do fluxo de líquido, e em parte do equipamento o líquido a ser evaporado pode ser alimentado em parte ao evaporador de forma contracorrente com o fluxo de vapor e em parte em concorrente.

Arranjos com alimentação mista só são encontrados em equipamentos com três ou mais efeitos (WESTPHLEN, 1999).

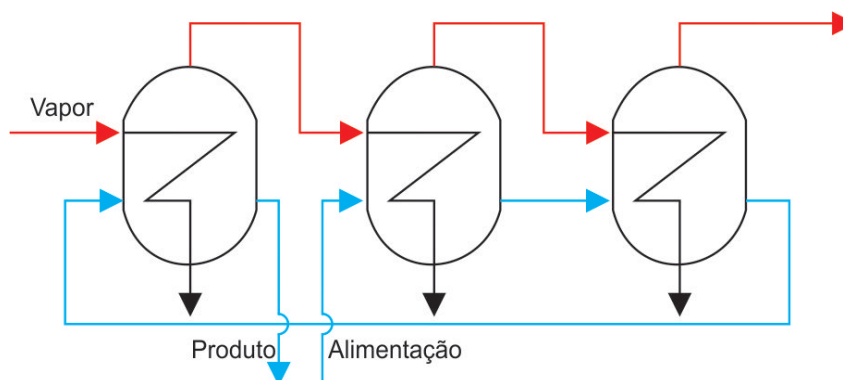


Figura 5 – Alimentação mista.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 6 apresenta o esquema dos sistemas de evaporação com alimentação paralela, onde ocorre a divisão do fluxo do líquido a ser evaporado, no número de efeitos e posterior mistura do produto concentrado. Este arranjo não é comumente encontrado nas indústrias e normalmente está associado a sistemas de cristalização (MINTON, 1986).

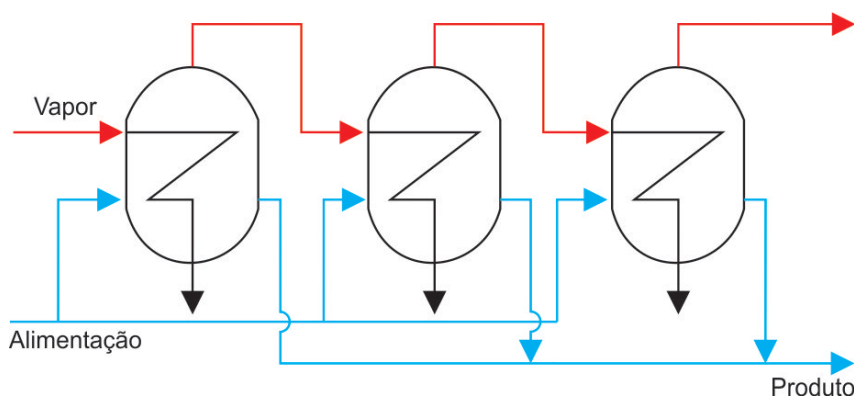


Figura 6 – Alimentação paralela.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Westphalen (1999) o número de arranjos de um evaporador é proporcional ao número de estágio do mesmo, desconsiderado a divisão de fluxo (alimentação paralela), a alimentação de um evaporador pode ser calculada da seguinte maneira:

No primeiro efeito: Alternativas de alimentação=Número de efeito-1;

No segundo efeito: Alternativas de alimentação=Número de efeito-2;

E assim por diante nos demais efeitos do evaporador. Logo o número de possíveis configurações de um evaporador é igual ao fatorial dos números de efeitos existentes. Na indústria de suco de laranja concentrado, por exemplo, são encontrados evaporadores com até 9 efeitos, o número possível de alternativas seria de $9! = 362\,880$.

2.2.2 REUTILIZAÇÃO DE VAPOR

Outra maneira de se obter uma economia de vapor em um sistema de evaporação, é a reutilização do vapor vegetal que produzido em um evaporador como meio de aquecimento do próprio efeito, ou ainda, em casos de múltiplos efeitos, ser utilizado como meio de aquecimento de outros efeitos. Porém como os sistemas de evaporação devem ser operados com pressões decrescentes para que haja diferenças de temperaturas necessárias para a transferência de calor, o vapor a ser reutilizado deve passar por um compressor (compressão mecânica) ou por um termocompressor (compressão térmica) (MINTON, 1986).

A compressão mecânica consiste basicamente no uso de um compressor mecânico que tem a função de comprimir o vapor vegetal que sai de um sistema para reutilizá-lo como meio de aquecimento do efeito anterior, como pode ser observado na Figura 7.

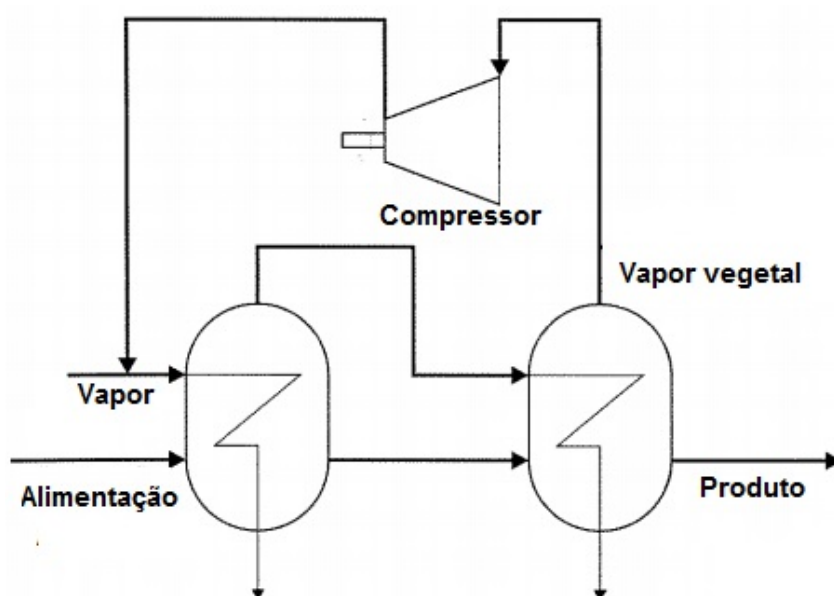


Figura 7 – Compressão mecânica.

Fonte: (WESTPHLEN, 1999).

Já na compressão térmica, no lugar do compressor utiliza-se um termocompressor, que possui o princípio de funcionamento igual a um injetor. Utiliza-se um jato de vapor de pressão elevada, que pode ser obtido de uma caldeira, junto com o vapor que sai do evaporador. A mistura desses vapores resulta em um evaporado de média pressão que poderá ser utilizado nos demais efeitos (FOUST et al., 2011).

A Figura 8 apresenta o esquema de funcionamento da utilização de um termocompressor para a reutilização do vapor.

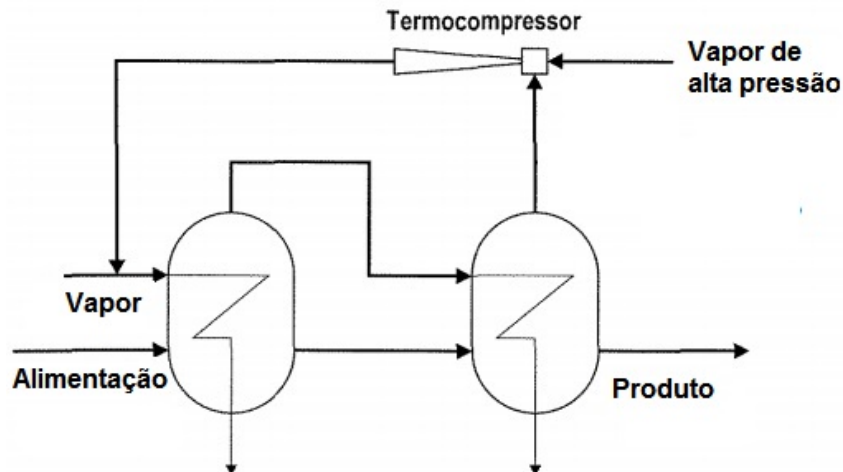


Figura 8 – Compressão térmica.

Fonte:(WESTPHLEN, 1999).

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA EM REGIME PERMANENTE

2.3.1 BALANÇO DE MASSA

Os balanços de massa e energia são utilizados para calcular o grau de concentração, a energia usada e o tempo de processo em um evaporador (FELLOWS, 2006).

O conceito básico do balanço de massa em um evaporador é: a massa do alimento que entra no evaporador é igual à massa de produto mais a massa de vapor removida do evaporador. Logo o balanço de massa global em regime permanente pode ser dado por:

$$m_f = m_p + m_v \quad (2.2)$$

Para a água presente no processo o balanço de massa é dado por:

$$m_f(1 - X_f) = m_p(1 - X_p) + m_v \quad (2.3)$$

Onde:

m_f = Vazão mássica da solução de alimentação;

m_p = Vazão mássica do produto concentrado;

m_v = Vazão mássica do vapor produzido;

X_f = Fração de sólidos no líquido de alimentação;

X_p = Fração de sólidos no produto.

Para solutos o balanço de massa é dado por:

$$m_f X_f = m_p X_p \quad (2.4)$$

2.3.2 BALANÇO DE ENERGIA

De acordo com Fellows (2006) a definição do balanço de energia é: a quantidade de calor cedida pelo vapor condensante é igual à quantidade de calor usada para elevar a temperatura da alimentação até o ponto de ebulição.

$$Q = m_u C p_a (T_{ebu} - T_i) + m_v \lambda_v \quad (2.5)$$

Onde:

m_u = Vazão mássica do vapor utilizado;

$C p_a$ = Calor específico do líquido de alimentação;

T_{ebu} = Temperatura de ebulição do produto;

T_i = Temperatura inicial de alimentação;

m_v = Vazão mássica do vapor produzido;

λ_v = calor latente de vaporização da água.

2.3.3 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

De acordo com Foust et al. (2011) o processo de transferência de calor normalmente requer a passagem de energia proveniente de um fluido calefator para a solução evaporante. Essa transferência de calor acontece através de uma parede divisória que separa o fluido quente da solução a ser evaporada.

O funcionamento de um evaporador está submetido às leis da transmissão de calor, de modo que a energia transferida é proporcional à diferença de temperatura entre os fluidos que trocam calor (ΔT), à superfície de aquecimento (A) e ao coeficiente global de transmissão de calor (U).

No coeficiente global de transmissão de calor são combinados os coeficientes de convecção do vapor condensante (muito alto), e da solução em ebulição, a resistência térmica da parede (geralmente desprezada) e as resistências devidas à formação de depósitos nas paredes dos tubos. Para superfícies do evaporador mantidas limpas, pode-se considerar apenas a evaporação da solução como determinante do processo de transferência de calor.

Geralmente o valor do coeficiente global de transferência de calor é um valor fornecido pelo fabricante do equipamento, porém também pode ser determinado experimentalmente em equipamentos pilotos ou a partir de experiências anteriores. O seu valor é dependente das propriedades da solução, do meio calefator e da geometria e tipo da superfície. Para a maioria dos processos de evaporação, a taxa de transferência de calor é o fator limitante, e a taxa de transferência de massa torna-se importante somente quando o líquido está altamente concentrado (MINTON, 1986).

A taxa de transferência de calor através das paredes do evaporador é encontrada pela Equação 2.6:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

Onde:

U = coeficiente global de troca térmica;

A = área de troca térmica;

ΔT = diferença de temperatura entre o produto e o vapor.

2.4 PROPRIEDADES TERMO FÍSICAS

As propriedades termo físicas (entalpia, calor específico e elevação do ponto de ebulição) dos produtos, que serão evaporados exercem grande influência sobre o projeto e operação dos equipamentos e sobre a otimização dos processos (CASTRO, 2006).

2.4.1 ENTALPIA E CALOR ESPECÍFICO

É possível calcular a entalpia de líquidos diretamente a partir da definição de calor específico a pressão constante que pode ser observado na Equação 2.7 (SMITH; Van Ness; ABBOTT, 2007).

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (2.7)$$

A entalpia de líquidos é praticamente independente da pressão, logo a Equação 2.7 pode ser integrada resultando na Equação 2.8 (SMITH; Van Ness; ABBOTT, 2007).

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT \quad (2.8)$$

No estado líquido, os valores de entalpia de referência h_0 e a temperatura de referência T_0 podem ser considerados iguais a zero para a temperatura de 0 °C (SMITH; Van Ness; ABBOTT, 2007).

2.4.2 ELEVAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO

A vaporização de um líquido puro não apresenta problemas especiais do ponto de vista termodinâmico, a temperatura do líquido em ebulição é fixada pela pressão exercida sobre ele, podendo ser calculada sem dificuldades uma vez conhecida a relação entre a pressão de vapor e a temperatura (FOUST et al., 2011).

A elevação do ponto de ebulição só pode ser calculada em soluções diluídas consideradas ideais, para as soluções reais os dados devem ser medidos experimentalmente medindo-se a curva de pressão de vapor para uma dada concentração em duas temperaturas diferentes (SILVA, 2013).

Já no caso de produtos alimentícios deve se considerar a presença de solutos, pois esta presença que provocará a elevação da temperatura de ebulição. O soluto reduz a pressão de vapor da solução, e a ebulição ocorre quando a pressão de vapor se iguala a pressão externa, logo o líquido a ser evaporado necessitará de uma temperatura maior para entrar em ebulição do que a utilizada para um líquido puro (CASTRO, 2006).

É possível encontrar dados de elevação do ponto de ebulição de várias substâncias químicas, além de diagramas, que mostram seu comportamento em função da pressão (CASTRO, 2006).

O diagrama de Dühring é um gráfico de temperatura de ebulição da substância contra a temperatura de ebulição da água pura na mesma pressão total para soluções de composição constantes (FOUST et al., 2011). Porém a complexa composição dos componentes dos produtos alimentícios dificulta a avaliação da elevação do ponto de ebulição (CASTRO, 2006).

Sendo assim, para a determinação desta propriedade nos produtos de interesse da Engenharia de Alimentos a serem evaporados é necessário um estudo das propriedades termodinâmicas (entalpia e calor específico), pois para cada produto existe uma correlação e um diagrama diferente. É possível encontrar estudos de alguns autores disponíveis na literatura, Westphalen (1999) reuniu dados de alguns destes autores em seu trabalho dentre eles:

- **Soluções de sacarose:** Peacock (1995) analisou as propriedades termodinâmicas de soluções de sacarose em água e determinou as correlações para os cálculos da elevação do ponto de ebulição através do teor de sólidos solúveis de cada concentração:

$$\Delta T_b = 6,064 \times 10^{-5} \left[\frac{(273 + T)^2 B^2}{(374,3 - T)^{0,38}} \right] [5,84 \times 10^{-7} (B - 40)^2 + 0,00072] \quad (2.9)$$

Onde:

B = Teor de sólidos solúveis; T = Temperatura da solução.

A Figura 9 apresenta o Diagrama de Dühring para a solução de sacarose.

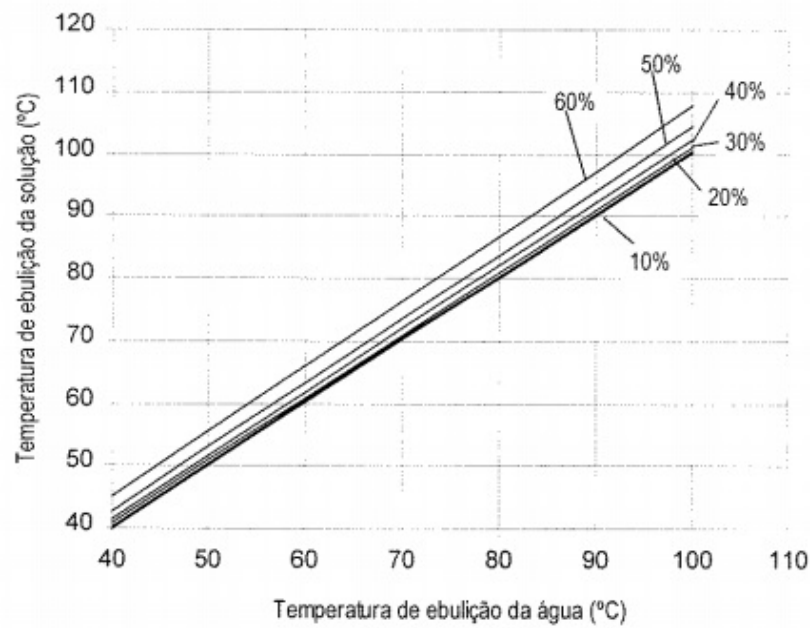


Figura 9 – Diagrama de Dühring para solução de sacarose.

Fonte: Peacock (1995).

- ➡ **Suco de Laranja:** Singh e Heldman (1993) estudaram experimentalmente as propriedades do suco de laranja propondo a seguinte equação para a determinação da elevação do ponto de ebulição:

$$\Delta T_b = 3,2 \cdot X_p - 2,42 \cdot X_p^2 + 14 \cdot X_p^3 \quad (2.10)$$

Onde:

X_p = fração de sólidos presentes no produto.

A Figura 10 apresenta o Diagrama de Dühring para o suco de laranja.

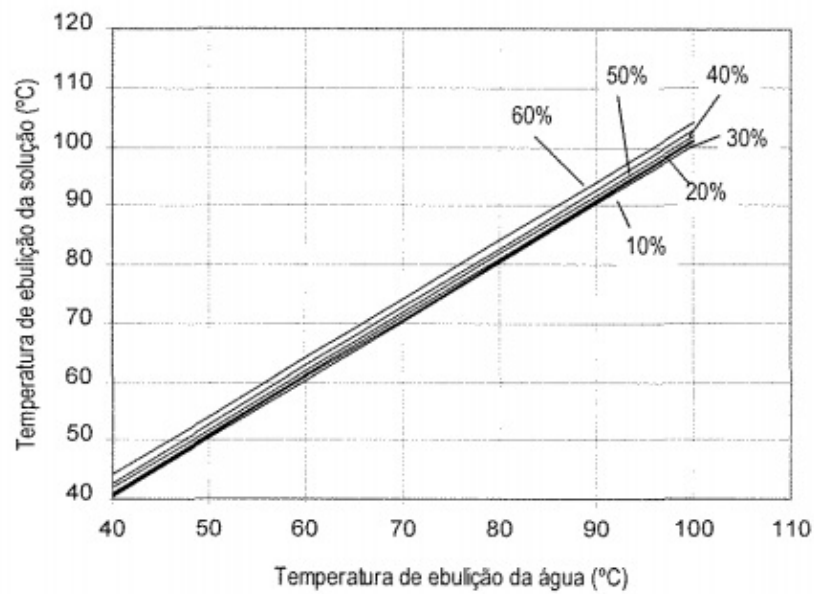


Figura 10 – Diagrama de Dühring para o suco de laranja.

Fonte: Moresi e Spinosi (1984).

- **Suco de maçã:** Crapiste e Lozano (1988) investigaram a influência da pressão e da concentração na elevação do ponto de ebulição propondo a seguinte equação empírica:

$$\Delta T_b = (1,3602 \times 10^{-2})(100 \cdot X_p)^{0,7489} \exp[3,390 \times 10^{-2}(100 \cdot X_p)] P^{0,1054} \quad (2.11)$$

Onde:

X_p = fração de sólidos presentes no produto.

P = pressão do produto.

A Figura 11 apresenta o Diagrama de Dühring para o suco de maçã.

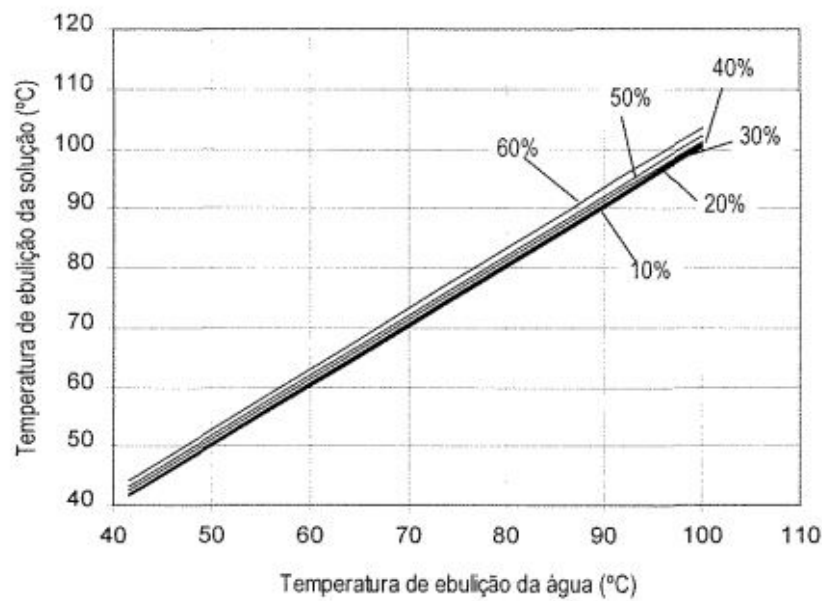


Figura 11 – Diagrama de Dühring para o suco de maçã.

Fonte: Crapiste e Lozano (1988).

Varshney e Barhate (1978) estudaram o efeito da concentração e do vácuo nas temperaturas de ebulição de suco de abacaxi, suco de manga e suco de limão, através de dados experimentais propuseram uma correlação linear entre a temperatura de ebulição destes sucos e a concentração de sólidos chegando na Equação 2.12.

$$T_{suco} = mX_p + T_0 \quad (2.12)$$

Onde:

m = constante de elevação do ponto de ebulição proposta por Varshney e Barhate (1978).

X_p = fração de sólidos presentes no produto.

T_0 = temperatura de referência.

Porém a Equação 2.12 apresenta correlações apenas para os valores de pressão estudados por Varshney e Barhate (1978), então Westphlen (1999) fez correlações entre estes dados propostos por Varshney e Barhate (1978) e os dados propostos por outros autores chegando nas seguintes correlações:

► **Suco de abacaxi:** Westphlen (1999) realizou correlações entre as equações propostas por Varshney e Barhate (1978) e por Crapiste e Lozano (1988) e chegou na Equação 2.13

$$\Delta T_b = \alpha(100X_p)^\beta \exp(\gamma 100X_p) P^\sigma \quad (2.13)$$

Onde:

X_p = fração de sólidos presentes no produto.

α_a = constante para o suco de abacaxi ($4,11 \times 10^{-2}$).

β_a = constante para o suco de abacaxi (1,4211).

γ_a = constante para o suco de abacaxi ($-7,45 \times 10^{-3}$).

σ_a = constante para o suco de abacaxi ($-0,0524$).

A Figura 12 apresenta o Diagrama de Dühring para o suco de abacaxi.

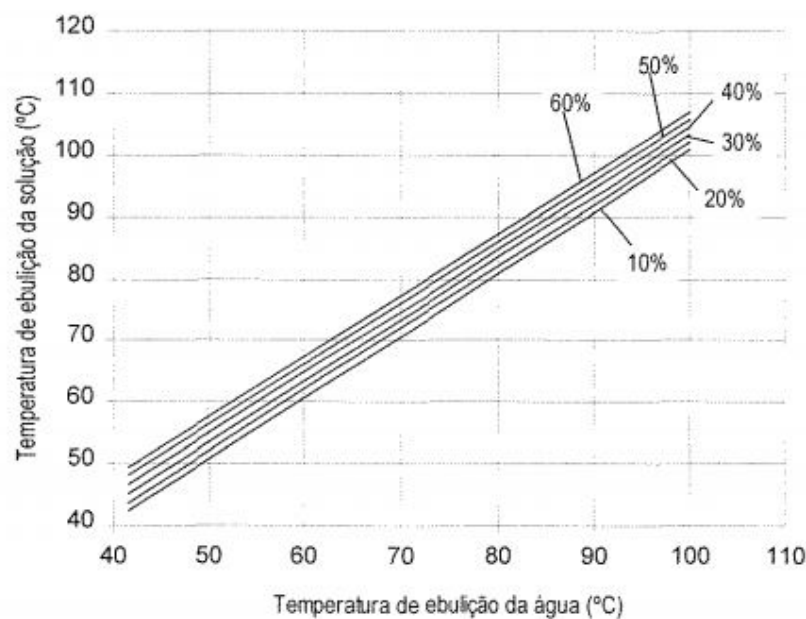


Figura 12 – Diagrama de Dühring para o suco de abacaxi.

Fonte: Westphalen (1999).

- **Suco de manga:** Para o suco de manga Westphalen (1999) realizou correlações entre as equações propostas por Varshney e Barhate (1978) e por Polley, Snyder e Kotnour (1980) chegando também na Equação 2.13, porém os valores das constantes para este suco são:

α_m = constante para o suco de manga ($5,77 \times 10^{-2}$).

β_m = constante para o suco de manga (1,4338).

γ_m = constante para o suco de manga ($-8,47 \times 10^{-3}$).

σ_m = constante para o suco de manga (0,1254).

- **Suco de limão:** Para o suco de manga Westphalen (1999) realizou correlações entre as equações propostas por Varshney e Barhate (1978) e por Polley, Snyder e Kotnour

(1980) chegando também na Equação 2.13, porém os valores das constantes para este suco são:

$\alpha_l =$ constante para o suco de limão ($3,10 \times 10^{-2}$).

$\beta_l =$ constante para o suco de limão (1,5355).

$\gamma_l =$ constante para o suco de limão ($-5,20 \times 10^{-3}$).

$\sigma_l =$ constante para o suco de limão ($-0,2064$).

A Figura 13 apresenta o Diagrama de Dühring para o suco de limão.

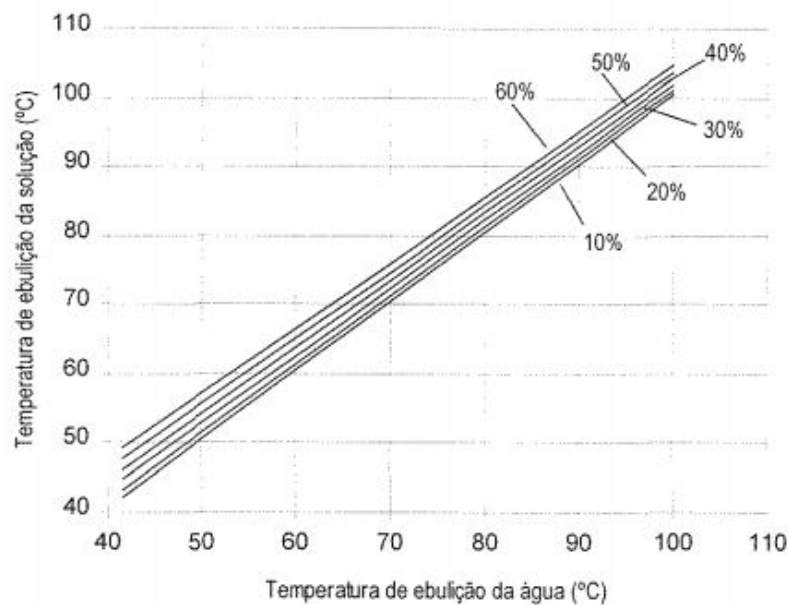


Figura 13 – Diagrama de Dühring para o suco de limão.

Fonte: Westphalen (1999).

► **Café solúvel:** Romero et al. (2001) realizaram estudos levando em consideração a concentração e a pressão do produto, chegando na seguinte equação:

$$\Delta T_b = 0,8474 \times 10^{-2} X_p^{0,9895} \exp(2,570 \times 10^{-2} X_p) P^{0,1163} \quad (2.14)$$

Onde:

X_p = fração de sólidos presente no produto.

P = pressão do produto.

3 SIMULAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 SIMULADORES DE PROCESSOS

A simulação e a modelagem matemática podem ser consideradas como um método científico de pesquisa que utiliza equações para representar um sistema real a partir da seleção dos principais efeitos físicos que o influenciam. O objetivo do modelo é descrever o sistema permitindo que o usuário preveja o seu comportamento quando as variáveis de entrada sofrerem alterações, podendo aperfeiçoar o comportamento de uma determinada operação (CAPUCHO et al., 2012).

Modelos analíticos auxiliam aos engenheiros a compreender e controlar os processos, muitas vezes são considerados complexos necessitando do auxílio de ferramentas de simulação para solucioná-los (BOHNOURD; FANAEI; ZOHREIRE, 2009).

Capucho et al. (2012) definem que a modelagem e simulação de uma operação podem ser realizadas a partir de um conjunto de etapas, onde inicialmente é feita uma definição do problema, em seguida o modelo real é descrito através de equações em um modelo matemático, então é realizada a coleta de dados para que o modelo seja testado em um *software* adequado para testes para a comprovação de que os resultados do modelo proposto estejam próximos o suficiente da realidade.

O uso de simuladores de processos têm se tornado cada vez mais frequente, tanto em indústrias quanto em instituições de ensino. O seu uso em sala de aula torna o aprendizado mais dinâmico e construtivo. As aulas passam a ser mais práticas e com um foco maior na real simulação com o intuito de prever o comportamento do sistema, economizando o tempo que seria gasto em atividades secundárias, com a solução manual das equações matemáticas complexas e a representação de seus resultados graficamente (RODRIGUES et al., 2006).

Muitas aplicações de simulação de processos são encontradas voltadas a processos químicos industriais, porém poucas são as aplicações encontradas para o seu uso em processos de produtos alimentícios (CHAWANKUL et al., 2001).

Os simuladores disponíveis no mercado podem ser divididos em dois grupos:

- ▣ **Simuladores sequenciais modulares:** Como o AspenPlus (2014) e o HYSYS.Process (2014) que possuem uma interface que dispensa ao usuário o conhecimento da modelagem no processo, tornando o seu uso muito restrito às condições impostas pelo modelo implementado (RODRIGUES et al., 2006).
- ▣ **Simuladores baseados em equações:** Possuem uma interface que permite que o usuá-

rio trabalhe diretamente com o modelo matemático, sendo extremamente flexíveis podendo se adaptar com situações diversas. O simulador *EMSO* se encaixa neste grupo (RODRIGUES et al., 2006).

3.2 *EMSO*

O simulador de processos *EMSO* (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*) é um *software* desenvolvido a partir do trabalho de Soares (2003) e que foi totalmente escrito em C++, uma linguagem de programação altamente utilizada no meio científico.

O *EMSO* possui a estrutura baseada em equações, seus modelos matemáticos são acessíveis ao usuário, permitindo que o mesmo escreva as equações da forma desejada e que possa realizar modificações quando houver a necessidade. Devido a sua estrutura ser baseada em equações, o simulador converte o sistema de equações descrito nos modelos, em um único sistema que será solucionado diretamente. Tais características são importantes para o seu uso em aplicações de pesquisa e desenvolvimento, onde constantemente são estudadas novas situações para os equipamentos (SILVA, 2012).

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DO *EMSO*

O simulador de processo *EMSO* foi desenvolvido por Soares (2003) com o intuito de apresentar um novo simulador genérico para processos dinâmicos que satisfaça os usuários, tanto do meio acadêmico quanto do meio industrial, de forma mais completa e acessível que os disponíveis no mercado.

Rodrigues et al. (2006) citam as principais características que tornam o *EMSO* um *software* que atende aos requisitos citados:

- **Interface:** A interface do simulador pode ser considerada “amigável”, uma vez que permite aos usuários manipular simultaneamente múltiplos modelos e, de maneira análoga, visualizar resultados na forma de gráficos.
- **Linguagem de modelagem:** Utiliza uma linguagem de modelagem própria, com conceitos de programação objeto orientada, tais como herança e composição. O conceito de herança permite a construção de modelos complexos a partir de modelos mais simples, e o conceito de composição permite a criação de modelos a partir de vários outros sub-modelos independentes.

A linguagem de modelagem é descritiva e estruturada e possui utilização prática, apresentando três entidades primordiais: *FlowSheet*, *DEVICES* e *Model* (SOARES, 2003).

- *FlowSheet:* O processo como um todo é representado por um *FlowSheet*, onde se contém todas as especificações do processo através de um conjunto de modelos e componentes chamados de *DEVICES*. Em sistemas dinâmicos, é necessário

especificar as condições iniciais, que são descritas na seção *INITIAL*, na seção *SET* são atribuídos os valores das constantes, e na seção *SPECIFY* são especificados valores para as variáveis a fim de remover os graus de liberdade do sistema.

- *DEVICES*: São equivalentes aos equipamentos de um processo ou as operações unitárias que compõem o *FlowSheet*.
- *Model*: É a descrição matemática de uma operação unitária ou equipamento, onde se abrange as seguintes seções: *PARAMETERS*, *VARIABLES* (onde há a declaração respectivamente das constantes e variáveis do sistema a ser modelado) e *EQUATIONS* (onde encontram-se as expressões das equações que descrevem o sistema).
- *Solvers*: São utilizados pacotes numéricos que servem para a resolução de sistemas de equações algébricas e/ou algébrico-diferenciais, para a solução de problemas estacionários e dinâmicos, e também para resolução de problemas de otimização e estimação de parâmetros.
- Rotinas externas: Permite que o usuário possa utilizar pacotes de propriedades físicas externas criados em linguagem C/C++ ou Fortran, facilitando a resolução de problemas mais complexos.
- Análise de Consistência: O simulador verifica se as equações descritas são consistentes quanto às unidades de medidas. Além disso, verifica os graus de liberdade do sistema, que é a diferença entre o número de equações e de variáveis, pois a simulação só ocorre quando o grau de liberdade é igual a zero, determinando assim, quantas especificações serão necessárias para que a simulação possa ocorrer.

O conceito de *Model* é ilustrado através do Código 3.1, que apresenta partes da modelagem matemática de um evaporador, enquanto que no Código 3.2 pode ser visualizado a simulação do equipamento através da descrição do *FlowSheet* do processo pelo usuário.

Código 3.1 – Model de um evaporador.

Model evaporador

PARAMETERS

```
TabelaVapor as Plugin (Brief="Tabela de Vapor", Type="water");
Solucao as Switcher (Brief="Tipo de solucao", Valid=["Suco de
    Laranja", "Suco de Limao", "Suco de Maca", "Suco de Abacaxi", "Suco
    de Manga", "Extrato Cafe"],
```

VARIABLES

```
P as pressao (Brief="Pressao no Evaporador");
Brix as positivo (Brief="Brix do Produto");
U as coef_trans (Brief="Coeficiente Global de Troca Termica");
```

```

A as area      (Brief="Area de Transferencia de Calor");
T as temperatura (Brief="Temperatura no Evaporador");
Q as potencia   (Brief="Taxa de Calor");
EPE as temp_delta (Brief="Elevacao do Ponto de Ebulicao Devido a
    Concentracao");
DT as temp_delta (Brief="Diferenca de Temperatura");

in EntradaVapor    as correnteVapor;
in Alimentacao     as corrente;
out SaidaCondensado as condensado;
out SaidaConcentrado as corrente;
out SaidaEvaporado  as vapor;

EQUATIONS

"Temperatura de Saturacao da Agua Pura"
    Tagua_Sat = TabelaVapor.Tsat (P);

"Economia de Vapor"
    Economia = SaidaEvaporado.F/EntradaVapor.F;

"Balanco de Massa Global"
    Alimentacao.F = SaidaConcentrado.F + SaidaEvaporado.F;

"Taxa de Calor"
    Q = U*A*DT;

"Balanco de Energia no Trocador"
    Q = EntradaVapor.F*(EntradaVapor.h-SaidaCondensado.h);

"Diferenca de Temperaturas"
    DT = EntradaVapor.T-T;

"Balanco de Energia no Evaporador"
    Q + Alimentacao.F*Alimentacao.h =
    SaidaConcentrado.F*SaidaConcentrado.h + SaidaEvaporado.F*
    SaidaEvaporado.h;

end

```

Código 3.2 – FlowSheet para a simulação do modelo de evaporador.

```

using "evaporadores.mso";

```

```

FlowSheet EFEITO_SIMPLES

```

DEVICES

```

CALDEIRA as fonteVapor;
EVAPORADOR as evaporador;

```

```
ALIMENTACAO as fonte;  
PRODUTO as sumidouro;  
EVAPORADO as sumidouroVapor;  
CONDENSADO as sumidouroVapor;
```

CONNECTIONS

```
EVAPORADOR.SaidaConcentrado to PRODUTO.Entrada;  
EVAPORADOR.SaidaEvaporado to EVAPORADO.Entrada;  
EVAPORADOR.SaidaCondensado to CONDENSADO.Entrada;  
ALIMENTACAO.Saida to EVAPORADOR.Alimentacao;  
CALDEIRA.Saida to EVAPORADOR.EntradaVapor;
```

SET

```
EVAPORADOR.Solucao = "Suco de Manga" ;  
EVAPORADOR.EPE_OPCAO = "Calcular" ;  
ALIMENTACAO.Solucao = "Suco de Manga" ;
```

SPECIFY

```
CALDEIRA.P = 210 * 'kPa' ;  
EVAPORADOR.P = 70 * 'kPa' ;  
EVAPORADOR.U = 2.5 * 'kW/m^2/K' ;  
EVAPORADOR.Brix = 60 ;  
ALIMENTACAO.T = 330 * 'K' ;  
ALIMENTACAO.P = 110 * 'kPa' ;  
ALIMENTACAO.F = 1000 * 'kg/h' ;  
ALIMENTACAO.Brix = 10 ;
```

OPTIONS

```
Dynamic = false;
```

```
end
```

4 IMPLEMENTAÇÃO DA BIBLIOTECA NO SIMULADOR

O simulador *EMSO* como já foi definido no Capítulo 3, é um simulador que possui uma interface de fácil entendimento e manipulação. No decorrer deste Capítulo será mostrada a interface gráfica da biblioteca de evaporadores e como proceder para a realização das simulações.

4.1 INTERFACE GRÁFICA AO USUÁRIO

A interface gráfica do simulador pode ser observada na Figura 14.

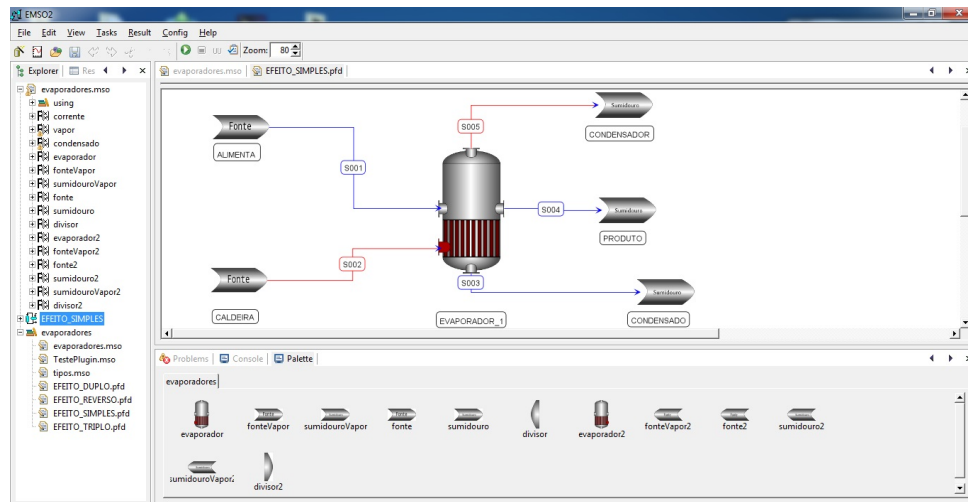
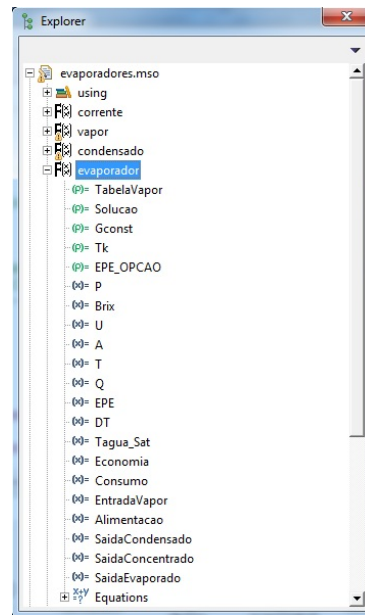


Figura 14 – Interface gráfica do simulador *EMSO*.

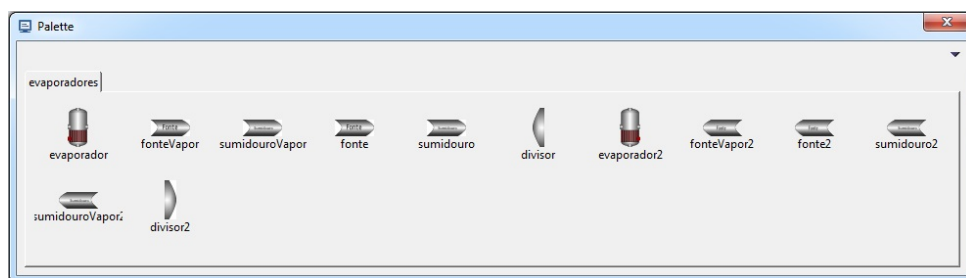
Fonte: Elaborado pelo autor.

O usuário pode criar seus próprios modelos, sem a necessidade de ter um conhecimento de programação, pois o simulador utiliza uma linguagem de modelagem descritiva. Os modelos criados ficam agrupados na guia *Explorer*. A reunião de vários modelos configura o que chamamos de biblioteca de modelos, e um exemplo pode ser observado na Figura 15.

Para inclusão de um sistema de evaporação, são utilizados os ícones que representam os evaporadores, as fontes de alimentação, os divisores e sumidores de processo. Esses ícones estão disponíveis na guia *Palette* do simulador, esta guia pode ser observada na Figura 16.

Figura 15 – Guia *Explorer*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – *Palette* com os ícones para inclusão do sistema de evaporação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para montagem do sistema de evaporação é necessário apenas um clique com o mouse no ícone desejado, então este ícone será disposto no *Flowsheet* de maneira gráfica, onde serão realizadas as conexões para criar o sistema desejado.

As conexões são feitas através do mouse, um exemplo pode ser observado na Figura 17 onde a linha de corrente da Fonte de Alimentação é arrastada para a entrada do Evaporador.

Após a realização das conexões de todos os módulos desejados no evaporador, inicia-se a determinação dos parâmetros para a realização da simulação.

Para que a simulação ocorra, como já foi explicado no Capítulo 3, o sistema irá analisar as equações descritas e determinar a quantidade de variáveis a serem especificadas para que os graus de liberdade do sistema sejam iguais a zero, ou seja, para realizar a simulação é necessário a pré-determinação de alguns parâmetros.

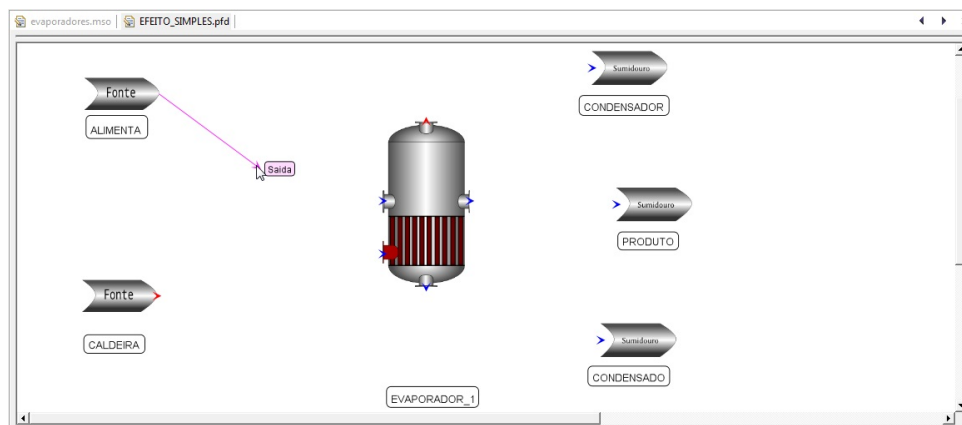


Figura 17 – Conexões das linhas de corrente para criação do sistema de evaporação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a adição desses parâmetros, o simulador possui janelas de diálogo para o evaporador e para todos os outros componentes da biblioteca.

4.1.1 CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO

A Figura 18 apresenta a janela de diálogo do modelo de alimentação para que o usuário insira o valor das variáveis necessárias. Nesta janela o usuário determina as propriedades, como temperatura, pressão, vazão do fluxo de alimentação e teor de sólidos solúveis da solução de alimentação. O sistema oferece ainda algumas opções de unidades de medida para que o usuário escolha.

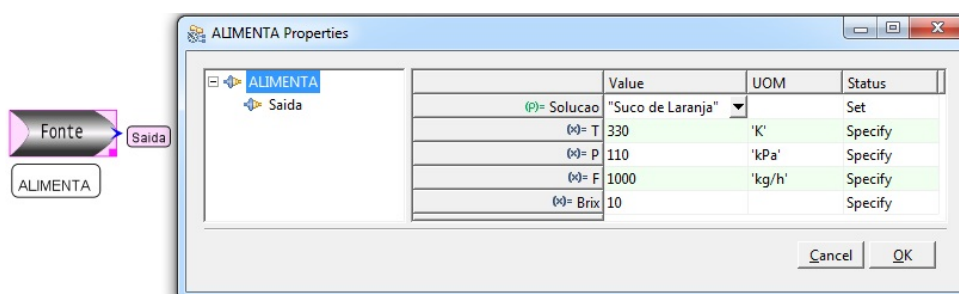


Figura 18 – Janela para especificações das propriedades do líquido de alimentação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 CORRENTE DO VAPOR DE AQUECIMENTO

A Figura 19 apresenta a janela de diálogo do modelo de alimentação de vapor para a inserção das propriedades do vapor de aquecimento do evaporador, como pressão e vazão do vapor.

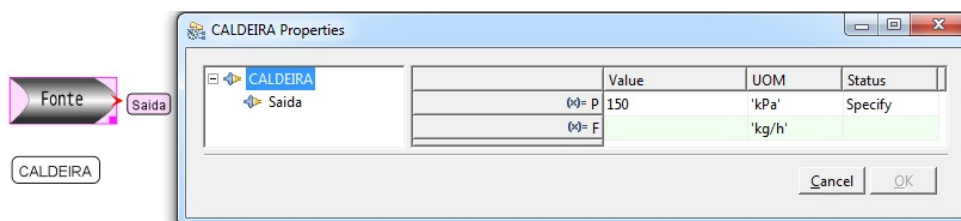


Figura 19 – Janela para especificações das propriedades do vapor de aquecimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 EVAPORADOR

Determinado as especificações das correntes de entrada no simulador, é necessário a determinação dos parâmetros de configuração do evaporador.

A Figura 20 apresenta a janela de diálogo dos parâmetros internos do evaporador, na qual o usuário determina o tipo de solução a ser evaporada, se irá considerar a EPE (elevação do ponto de ebulição) da solução, e as variáveis que configuram o processo: pressão do evaporador, o °Brix desejado para a solução e o coeficiente global de troca térmica.

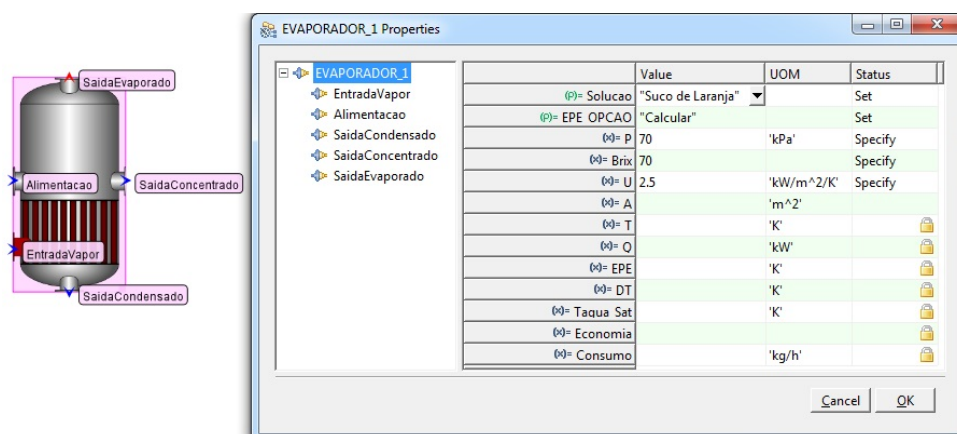


Figura 20 – Janela das propriedades do evaporador.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As guias que contém o símbolo de um cadeado, são as guias que retornam os resultados provenientes da simulação.

Após a inserção de todas as variáveis necessárias, o usuário precisa apenas clicar no botão *run* indicado pela Figura 21, para o simulador então realizar as análises de consistência para que a simulação ocorra.

Caso o simulador encontre algum erro na análise, como a falta de alguma variável necessária, por exemplo, este erro será indicado na guia *Problems*, para que o usuário possa identificar e corrigi-lo.

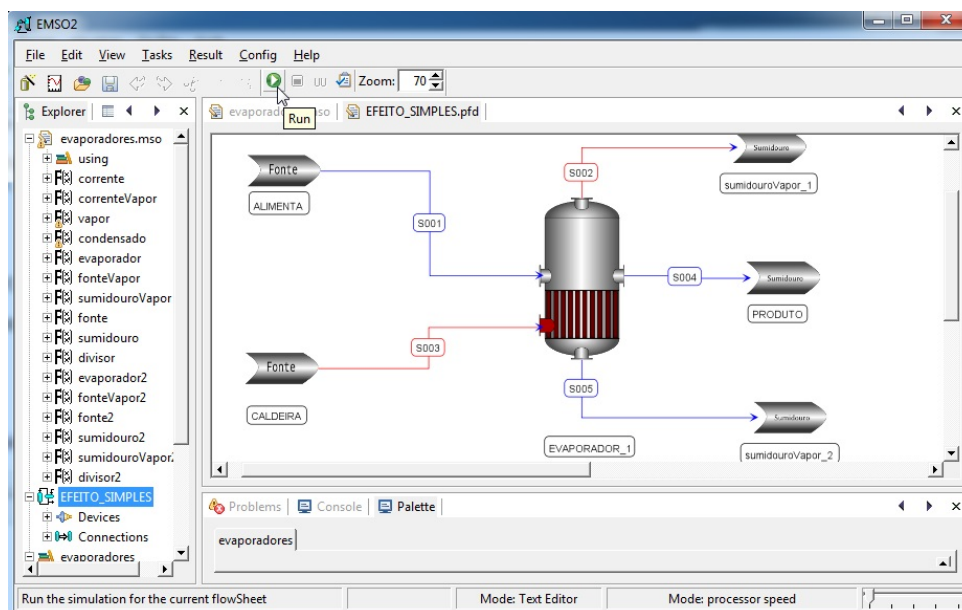


Figura 21 – Botão para início da simulação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a realização da simulação o simulador apresenta os resultados de maneira geral na guia *Results* que se encontra à esquerda no simulador como apresentado na Figura 22.

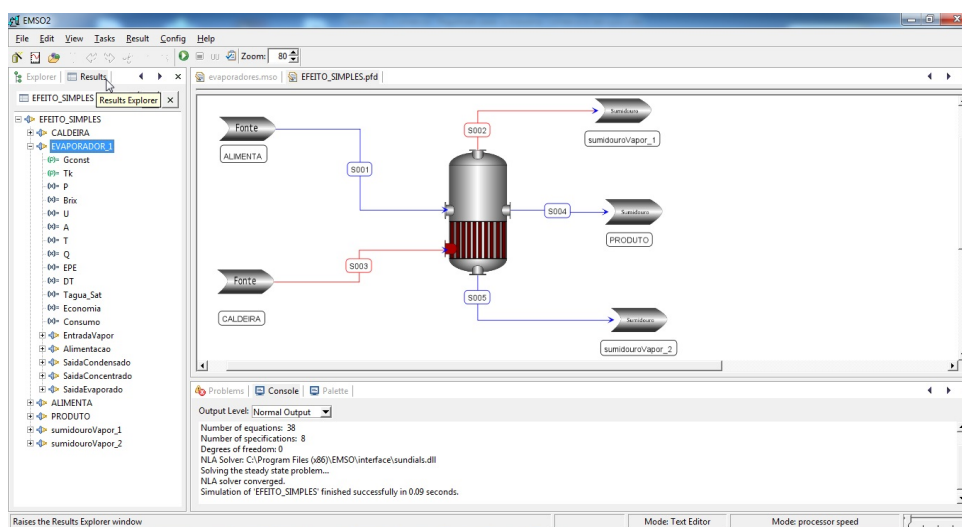


Figura 22 – Resultados da Simulação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da simulação podem ser vistos diretamente no simulador ou exportados para serem visualizados numa planilha eletrônica, como o *Excel*¹ ou o *LibreOffice*², por exemplo (Figura 23).

¹ Excel é uma marca registrada da Microsoft Corporation.

² LibreOffice é um *software livre* da The Document Foundation, entidade sem fins lucrativos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
10	T	'K'	370,3030							
11	Q	'kW'	565,0370							
12	EPE	'K'	7,2211							
13	DT	'K'	24,6083							
14	Tagua_Sat	'K'	363,0820							
15	Economia		0,9001							
16	Consumo	'kg/h'	833,3330							
17	EntradaVapor									
18	T	'K'	394,9110							
19	P	'kPa'	210,0000							
20	F	'kg/h'	925,7800							
21	h	'kJ/kg'	2708,4800							
22	s	'kJ/kg/K'	7,1106							
23	Alimentacao									
24	T	'K'	330,0000							
25	P	'kPa'	110,0000							
26	F	'kg/h'	1000,0000							

Planilha 3 / 7 Padrão Soma=0 100%

Figura 23 – Resultados da Simulação na planilha *Calc* do LibreOffice.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 SIMULAÇÃO DE EVAPORADORES EM REGIME PERMANENTE

A biblioteca implementada é composta por equações para a simulação de um sistema genérico de evaporação dos seguintes produtos: suco de laranja, suco de maçã, suco de abacaxi, suco de limão, suco de manga e café solúvel. Para demonstração neste trabalho, tomou-se como base o suco de laranja.

5.1 SUCO DE LARANJA

A laranja representa aproximadamente 49% da produção brasileira de frutas (NETO et al., 2011). O Brasil é o maior produtor e exportador de suco de laranja concentrado do mundo, no ano de 2010 foi responsável por 80 % de toda a exportação mundial (MAPA, 2010).

De acordo com dados da CitrusBR (2014) a safra comercial de 2013/2014 somente no estado de São Paulo, que é o maior produtor do Brasil, foi de aproximadamente 267 milhões de caixas de 40,8 kg cada de laranja colhidas, a cotação do valor de cada caixa ficou em média de R\$ 7,13 para indústria. O volume de suco concentrado para exportação nesse período foi de aproximadamente 1080 toneladas.

O suco de laranja, após extraído da fruta é filtrado, clarificado e pasteurizado, a pasteurização é o tratamento térmico usado para inativar as enzimas pectolíticas. Durante a concentração, o teor de sólidos solúveis presentes no suco deve passar de 10–12°Brix, para 66°Brix aproximadamente. A temperatura interna dos evaporadores deve permanecer entre 40 a 85 °C para não gerar características sensoriais indesejadas (FILHO, 2005; GAVA; SILVA; FRIAS, 2008).

Os modelos de evaporadores mais utilizados para a concentração do suco de laranja são: Evaporadores de película descendente, Evaporadores de placas e Evaporadores *Centri-Therm*. Dentre estes, o último vem sendo mais empregado pois o tempo de residência do suco no evaporador é praticamente de apenas um segundo (SIEWERDT, 2011).

Nos evaporadores de placas tanto de película descendente e quanto de película ascendente, a concentração é realizada em geral por dois efeitos. O aquecimento e a descompressão no interior do evaporador fazem o suco entrar em ebulição à temperatura de 75 °C.

Os vapores do primeiro estágio, somados a novas cargas de vapor provenientes da caldeira, são aproveitados para provocar nova concentração em um segundo estágio onde o suco passa a ter o valor de Brix adequado. Os vapores são extraídos e condensados em um sistema de vácuo que permite a ebulição neste segundo efeito à temperatura de 54 °C ao sair

do evaporador, o suco é resfriado até 27 °C, em curto lapso de tempo. Com esta temperatura, o concentrado segue as etapas seguintes para congelamento e embalagem (SIEWERDT, 2011).

As simulações foram realizadas em um modelo de evaporador genérico e estão descritas a seguir.

5.1.1 EVAPORADOR COM UM EFEITO SIMPLES

Considerando um evaporador, representado pela Figura 24, com pressão interna de 70 kPa e um coeficiente global de troca térmica de $2,5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$. Utilizando como meio de aquecimento o vapor proveniente de uma caldeira com pressão de 210 kPa. Para concentrar o suco de laranja com teor de sólidos solúveis inicial de 11 °Brix até atingir 65 °Brix com temperatura inicial de 80 °C, a uma pressão de 110 kPa, e uma vazão de 1000 kg/h.

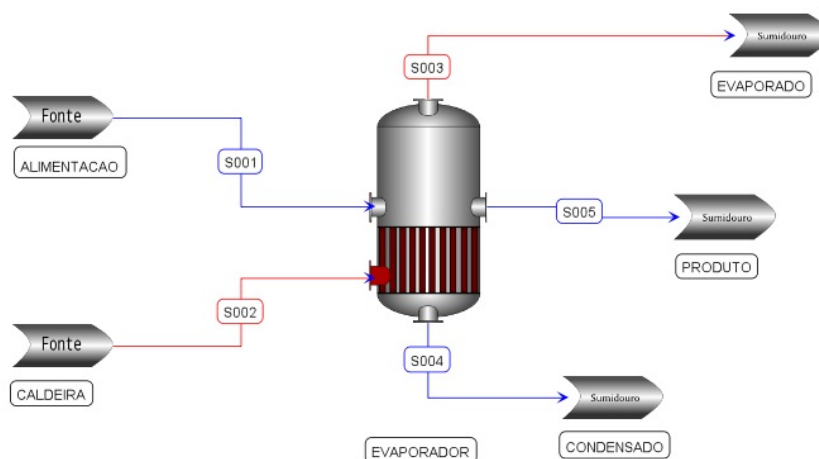


Figura 24 – Representação gráfica de um evaporador de efeito simples.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de consistência do simulador demonstrou que nessa configuração a simulação apresenta 46 variáveis e 38 equações, sendo necessárias 8 especificações para que a simulação possa ocorrer.

Os principais resultados desta simulação podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da simulação: Evaporador de efeito simples.

Parâmetros	Valores	Unidades
Vazão suco concentrado	169,23	kg/h
Vazão do evaporado	830,76	kg/h
Vazão do vapor de aquecimento	885,47	kg/h
Temperatura do concentrado e evaporado	94,8	°C
Taxa de calor	540,43	kW
Consumo de vapor	830,76	kg/h
Economia de vapor	0,93	–
Área de troca térmica	8,02	m ²

5.1.2 EVAPORADOR COM EFEITO DUPLO COM ALIMENTAÇÃO FRONTAL

Considerando um sistema de evaporação com dois efeitos, representado pela Figura 25, com pressão interna no primeiro evaporador de 70 kPa e de 40 kPa no segundo evaporador, e um coeficiente global de troca térmica de $2,5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ para ambos evaporadores. Utilizando como meio de aquecimento o vapor proveniente de uma caldeira com pressão de 200 kPa para o primeiro evaporador e 70 kPa com alimentação de 400 kg/h para o segundo. Para concentrar o suco de laranja com teor de sólidos solúveis inicial de 10°Brix até atingir 66°Brix com temperatura inicial de 56,85 °C, a uma pressão de 110 kPa, e uma vazão de 1000 kg/h.

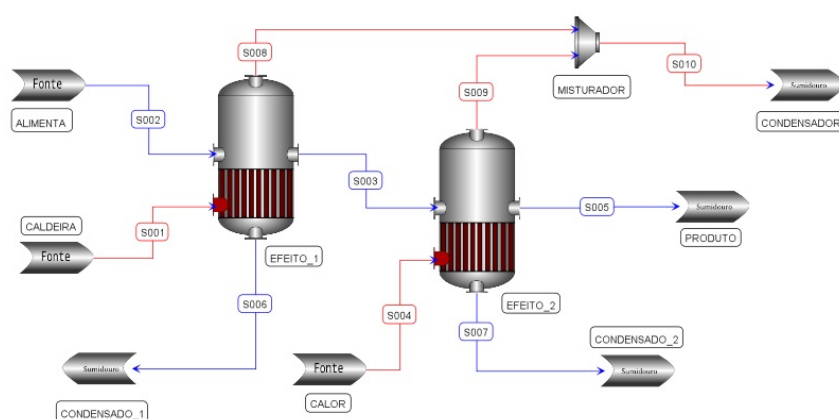


Figura 25 – Representação gráfica de um sistema de evaporação com dois efeitos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa configuração gerou 86 variáveis e 74 equações, sendo necessárias 12 especificações para que a simulação pudesse ocorrer sem erros.

Os principais resultados obtidos estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação com dois efeitos.

Parâmetros	Valores	Unidades
Vazão suco concentrado	151,51	kg/h
Vazão do condensado no 1° evaporador	46,44	kg/h
Vazão do condensado no 2° evaporador	400,00	kg/h
Vazão do evaporado	395,45	kg/h
Temperatura do concentrado e evaporado	80,94	°C
Taxa de calor no 1° efeito	28,40	kW
Taxa de calor no 2° efeito	253,63	kW
Consumo de vapor no 1° efeito	453,02	kg/h
Consumo de vapor no 2° efeito	395,45	kg/h
Economia de vapor no 2° efeito	0,98	–
Área de troca térmica no 1° efeito	12,18	m ²
Área de troca térmica no 2° efeito	11,28	m ²

5.1.3 EVAPORADOR COM EFEITO TRIPLO COM ALIMENTAÇÃO FRONTAL

Considerando um sistema de evaporação com três efeitos, representado pela Figura 26, com pressão interna no primeiro evaporador de 70 kPa, de 45 kPa no segundo e de 12 kPa no terceiro evaporador, e um coeficiente global de troca térmica de $2,5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ para ambos. Utilizando como meio de aquecimento o vapor proveniente de uma caldeira com pressão de 250 kPa para o primeiro evaporador, e utilizando o o vapor evaporado do sistema anterior como meio de aquecimento para os demais. Para concentrar o suco de laranja com teor de sólidos solúveis inicial de 12°Brix até atingir 65°Brix com temperatura inicial de 76,85 °C, a uma pressão de 130 kPa, e uma vazão de 5000 kg/h.

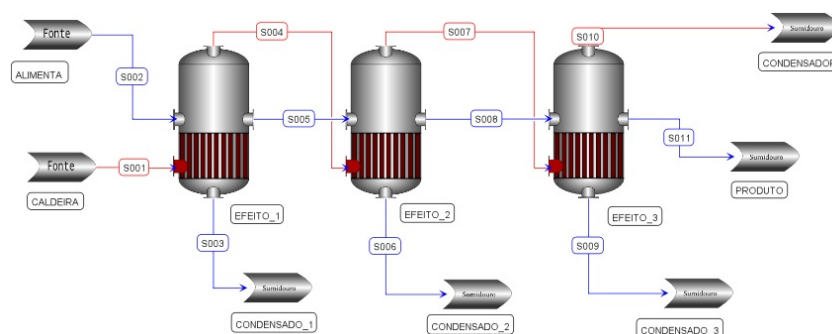


Figura 26 – Representação gráfica de um sistema de evaporação triplo com alimentação frontal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de consistência do simulador demonstrou que nessa configuração a simulação apresenta 102 variáveis e 90 equações, sendo necessárias 12 especificações para que a simulação ocorra sem erros.

Os principais resultados obtidos estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação triplo efeito com alimentação frontal.

Parâmetros	Valores	Unidades
Vazão de entrada do vapor de aquecimento no 1° efeito	1483,13	kg/h
Vazão suco concentrado	923,07	kg/h
Vazão do evaporado	1416,98	kg/h
Vazão do condensado no 1° efeito	1483,13	kg/h
Vazão do condensado no 2° efeito	1302,54	kg/h
Vazão do vapor de aquecimento no 3° efeito	1357,41	kg/h
Temperatura do concentrado e evaporado	49,42	°C
Taxa de calor no 1° efeito	898,59	kW
Taxa de calor no 2° efeito	826,31	kW
Taxa de calor no 3° efeito	871,49	kW
Consumo de vapor no 1° efeito	1302,54	kg/h
Consumo de vapor no 2° efeito	1357,40	kg/h
Consumo de vapor no 3° efeito	1416,98	kg/h
Economia de vapor no 1° efeito	0,87	–
Economia de vapor no 2° efeito	1,04	–
Economia de vapor no 3° efeito	1,04	–
Área de troca térmica no 1° efeito	9,72	m ²
Área de troca térmica no 2° efeito	28,17	m ²
Área de troca térmica no 3° efeito	11,89	m ²

5.1.4 EVAPORADOR COM EFEITO TRIPLO COM ALIMENTAÇÃO REVERSA

Considerando um sistema de evaporação com três efeitos, representado pela Figura 27, com pressão interna no primeiro evaporador de 12 kPa, de 45 kPa no segundo e de 70 kPa no terceiro evaporador, e um coeficiente global de troca térmica de $2,5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ para ambos. Utilizando como meio de aquecimento o vapor proveniente de uma caldeira com pressão de 250 kPa para o terceiro evaporador, e utilizando o vapor evaporado do sistema anterior como meio de aquecimento para os demais. Para concentrar o suco de laranja com teor de sólidos solúveis inicial de 12°Brix até atingir 65°Brix com temperatura inicial de 76,85 °C, a uma pressão de 130 kPa, e uma vazão de 5000 kg/h.

Como essa configuração também é composta por três evaporadores com reutilização de vapor, o número de variáveis, equações e especificações são os mesmos que os citados no exemplo anterior (efeito triplo frontal). A única diferença desta configuração está na alimentação, que neste caso é reversa, ou seja, o sentido do fluxo do vapor de aquecimento é contrário ao sentido do fluxo do líquido de alimentação.

Os principais resultados obtidos estão listados na Tabela 4.

Em comparação ao sistema de triplo efeito com alimentação frontal, o sistema com alimentação reversa apresenta uma maior economia de vapor, porém a temperatura de saída do suco se encontra acima do limite de segurança para preservar a qualidade do suco,

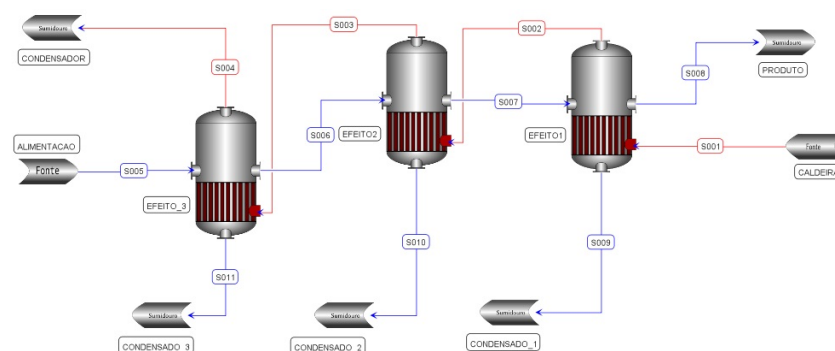


Figura 27 – Representação gráfica de um sistema de evaporação triplo com alimentação reversa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação triplo com alimentação reversa.

Parâmetros	Valores	Unidades
Vazão de entrada do vapor de aquecimento	1506,65	kg/h
Vazão suco concentrado	923,07	kg/h
Vazão do evaporado	1426,95	kg/h
Vazão do condensado no 1º efeito	1506,65	kg/h
Vazão do condensado no 2º efeito	1407,83	kg/h
Vazão do condensado no 3º efeito	1242,15	kg/h
Temperatura do concentrado e evaporado	94,83	°C
Taxa de calor no 1º efeito	931,70	kW
Taxa de calor no 2º efeito	903,02	kW
Taxa de calor no 3º efeito	794,20	kW
Consumo de vapor no 1º efeito	1417,93	kg/h
Consumo de vapor no 2º efeito	1237,02	kg/h
Consumo de vapor no 3º efeito	1421,98	kg/h
Economia de vapor no 1º efeito	0,92	–
Economia de vapor no 2º efeito	0,87	–
Economia de vapor no 3º efeito	1,14	–
Área de troca térmica no 1º efeito	11,43	m ²
Área de troca térmica no 2º efeito	22,40	m ²
Área de troca térmica no 3º efeito	10,84	m ²

que seria de no máximo de 85 °C. Por este motivo que a alimentação reversa não é muito utilizada para evaporação de produtos alimentícios.

Nas simulações descritas a pressão é fixada e o simulador calcula a temperatura de equilíbrio, porém pela análise de consistência dos graus de liberdade do simulador, é possível fixar a temperatura num efeito qualquer para que o simulador forneça o valor da pressão de equilíbrio. Dessa forma, foi realizada uma nova simulação fixando a temperatura no último evaporador em 85 °C, que é o máximo de temperatura aceita para que o suco não perca suas propriedades, teve-se então o valor de pressão de aproximadamente 48 kPa.

5.1.5 EVAPORADOR DE MÚLTIPLO EFEITO COM ALIMENTAÇÃO REVERSA

Considerando um sistema de evaporação com cinco efeitos, representado pela Figura 28, com pressão interna no primeiro evaporador de 28 kPa, de 40 kPa no segundo, de 53 kPa no terceiro, 67 kPa no quarto, e de 87 kPa no quinto, e um coeficiente global de troca térmica de $2,5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ para ambos.

Utilizando como meio de aquecimento o vapor proveniente de uma caldeira com pressão de 300 kPa para o quinto evaporador, e utilizando o vapor evaporado do sistema anterior como meio de aquecimento para os demais. Para concentrar o suco de laranja com teor de sólidos solúveis inicial de 12°Brix até atingir 65°Brix com temperatura inicial de 80°C , a uma pressão de 150 kPa, e uma vazão de 5000 kg/h.

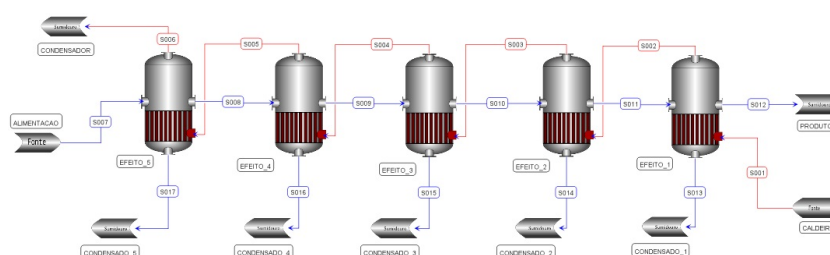


Figura 28 – Representação gráfica de um sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação reversa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para essa simulação a análise de consistência do simulador demonstrou que existem 158 variáveis e 142 equações, sendo necessárias 16 especificações para que a simulação possa ocorrer.

Os principais resultados obtidos estão listados na Tabela 5.

Essa configuração segue o mesmo problema da simulação de efeito triplo reversa, como a pressão nos simuladores é crescente a temperatura segue também crescente e na saída do produto já concentrado a temperatura esta acima do limite de segurança para manter as propriedades e qualidade do suco que é de 85°C . Refazendo a simulação fixando a temperatura no último evaporador para 85°C , a pressão obtida é de aproximadamente 58 kPa.

Tabela 5 – Resultados da simulação: Sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação reversa.

Parâmetros	Valores	Unidades
Vazão de entrada do vapor de aquecimento	934,53	kg/h
Vazão suco concentrado	923,07	kg/h
Vazão do evaporado	830,89	kg/h
Vazão do condensado no 1° efeito	734,29	kg/h
Vazão do condensado no 2° efeito	797,29	kg/h
Vazão do condensado no 3° efeito	841,33	kg/h
Vazão do condensado no 4° efeito	873,11	kg/h
Vazão do condensado no 5° efeito	934,36	kg/h
Temperatura do concentrado e evaporado	95,75	°C
Taxa de calor no 1° efeito	561,51	kW
Taxa de calor no 2° efeito	549,96	kW
Taxa de calor no 3° efeito	534,17	kW
Taxa de calor no 4° efeito	509,61	kW
Taxa de calor no 5° efeito	472,90	kW
Consumo de vapor no 1° efeito	873,11	kg/h
Consumo de vapor no 2° efeito	841,33 k	kg/h
Consumo de vapor no 3° efeito	797,29	kg/h
Consumo de vapor no 4° efeito	734,29	kg/h
Consumo de vapor no 5° efeito	830,89	kg/h
Economia de vapor no 1° efeito	0,93	–
Economia de vapor no 2° efeito	0,96	–
Economia de vapor no 3° efeito	0,94	–
Economia de vapor no 4° efeito	0,92	–
Economia de vapor no 5° efeito	1,13	–
Área de troca térmica no 1° efeito	5,94	m ²
Área de troca térmica no 2° efeito	31,40	m ²
Área de troca térmica no 3° efeito	35,56	m ²
Área de troca térmica no 4° efeito	29,46	m ²
Área de troca térmica no 5° efeito	22,68	m ²

5.1.6 EVAPORADOR DE MÚLTIPLO EFEITO COM ALIMENTAÇÃO FRONTAL

Considerando um sistema de evaporação com seis efeitos, representado pela Figura 29, com pressão interna no primeiro evaporador de 87 kPa, de 77 kPa no segundo, 63 kPa no terceiro, 51 kPa no quarto, 38 kPa no quinto, e 26 kPa no sexto, e um coeficiente global de troca térmica de $2,5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ para ambos. Utilizando como meio de aquecimento o vapor proveniente de uma caldeira com pressão de 300 kPa para o primeiro evaporador, e utilizando o vapor evaporado do sistema anterior como meio de aquecimento para os demais. Para concentrar o suco de laranja com teor de sólidos solúveis inicial de 10°Brix até atingir 66°Brix com temperatura inicial de 80 °C, a uma pressão de 150 kPa, e uma vazão de 5000 kg/h.

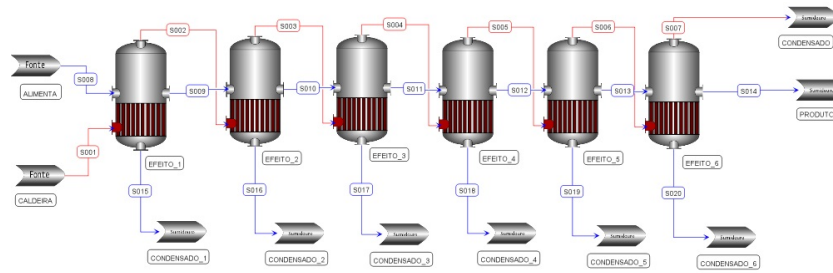


Figura 29 – Representação gráfica de um sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação frontal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de consistência do simulador demonstrou que para esta simulação existem 186 variáveis com 168 equações, sendo necessárias 18 especificações para que a simulação ocorra.

Os principais resultados obtidos estão listados na Tabela 6.

Em termos de economia de vapor os sistemas de evaporação com alimentação frontal possuem uma menor economia, porém a temperatura de saída do produto está abaixo do limite máximo estabelecido, ou seja, o produto deixa o evaporador com as características sensoriais desejadas.

É importante lembrar que essas simulações foram feitas considerando-se um evaporador genérico.

Tabela 6 – Resultados da simulação: sistema de evaporação de múltiplo efeito com alimentação frontal.

Parâmetros	Valores	Unidades
Vazão de entrada do vapor de aquecimento	824,76	kg/h
Vazão suco concentrado	757,57	kg/h
Vazão do evaporado	753,80	kg/h
Vazão do condensado no 1° efeito	824,76	kg/h
Vazão do condensado no 2° efeito	650,62	kg/h
Vazão do condensado no 3° efeito	672,52	kg/h
Vazão do condensado no 4° efeito	700,86	kg/h
Vazão do condensado no 5° efeito	722,60	kg/h
Vazão do condensado no 6° efeito	742,00	kg/h
Temperatura do concentrado e evaporado	65,84	°C
Taxa de calor no 1° efeito	495,64	kW
Taxa de calor no 2° efeito	409,82	kW
Taxa de calor no 3° efeito	425,22	kW
Taxa de calor no 4° efeito	445,78	kW
Taxa de calor no 5° efeito	462,36	kW
Taxa de calor no 6° efeito	478,50	kW
Consumo de vapor no 1° efeito	650,62	kg/h
Consumo de vapor no 2° efeito	672,52	kg/h
Consumo de vapor no 3° efeito	700,86	kg/h
Consumo de vapor no 4° efeito	722,60	kg/h
Consumo de vapor no 5° efeito	742,00	kg/h
Consumo de vapor no 6° efeito	753,80	kg/h
Economia de vapor no 1° efeito	0,78	–
Economia de vapor no 2° efeito	1,03	–
Economia de vapor no 3° efeito	1,04	–
Economia de vapor no 4° efeito	1,03	–
Economia de vapor no 5° efeito	1,02	–
Economia de vapor no 6° efeito	1,01	–
Área de troca térmica no 1° efeito	5,24	m ²
Área de troca térmica no 2° efeito	49,69	m ²
Área de troca térmica no 3° efeito	32,23	m ²
Área de troca térmica no 4° efeito	33,19	m ²
Área de troca térmica no 5° efeito	25,75	m ²
Área de troca térmica no 6° efeito	21,78	m ²

6 CONCLUSÃO

Este trabalho não teve como objetivo propor uma biblioteca de processos ideal para cada tipo de evaporador utilizados na indústria de alimentos, mas sim aprimorar uma biblioteca de evaporadores genéricos já existente em um simulador de código aberto para que esta pudesse ser utilizada para simulação de processos de interesse da engenharia de alimentos.

Espera-se que com o aprimoramento da biblioteca, esta possa ser utilizada principalmente como ferramenta de ensino nas universidades, pois as inúmeras possibilidades de configuração de um sistema de evaporação, tanto pelo arranjo e número de efeitos, quanto pela inclusão de acessórios dificulta o seu estudo, tornando assim a utilização do simulador uma ferramenta para facilitar ao acadêmico a visualização do processo.

Além disso, neste trabalho foi apresentado o uso do simulador de processos *EMSO*, um simulador de fácil manipulação e que permite ao usuário realizar as simulações dos sistemas de evaporação utilizados na engenharia de alimentos sem a necessidade de ter um conhecimento avançado na área de programação.

A biblioteca de evaporadores implementada é composta por equações para a simulação de suco de laranja, suco de maçã, suco de limão, suco de abacaxi e café solúvel. Para apresentação neste trabalho foi utilizado apenas o suco de laranja, produto o qual o Brasil é líder na produção e exportação. Essas equações foram obtidas através de pesquisa bibliográfica.

Teoricamente, o simulador *EMSO* poderia simular uma quantidade infinita de efeitos, restritas apenas à memória do computador, contudo, à medida que os efeitos aumentam, aumentam também o número de equações a serem resolvidas. O sistema de equações formado é altamente não linear e, apesar do simulador poder tratar com esses sistemas, ainda é necessário um tempo maior para a completa identificação dos ajustes necessários a serem feitos nos modelos para que o seu uso tenha uma maior robustez quanto à convergência.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Implementação dos acessórios, como compressores, bombas e termocompressores para a simulação;
- Implementação de evaporadores específicos como, por exemplo, evaporadores do tipo *TASTE* muito utilizado para evaporação de suco de laranja;
- Extensão da biblioteca com a implementação de novas correlações para simulações de novos produtos de interesse da engenharia de alimentos;

- Estender a modelagem de evaporadores para o sistema transiente, onde será possível realizar estudos de estratégias de controle, partidas e paradas da planta;
- Produção de um manual de uso da biblioteca, para que o usuário possa ter uma maior compreensão das possibilidades de simulação.

REFERÊNCIAS

- ASPENTECH. **AspenPlus**. 2014. Disponível em: <<http://www.aspentech.com/products/aspens-plus.aspx>>.
- ASPENTECH. **HYSYS.Process**. 2014. Disponível em: <<http://www.aspentech.com/products/aspens-hysys.aspx>>.
- AVALO, B.; VARELA, A. Modeling and simulation of a triple effect evaporator for the concentration of natural juices. **Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia**, v. 31, n. 2, 2008.
- BOHNOURD, F. M.; FANAELI, M. A.; ZOHREI, H. Dynamic simulation of multi-effect falling-film evaporator: Milk powder production plant. In: THE 6 TH INTERNATIONAL CHEMICAL ENGINEERING CONGRESS E EXHIBITION. [S.l.], 2009.
- BRANDÃO, S. C. C.; TEIXEIRA, M. C. B. **Evaporadores**. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 1985.
- CAPUCHO, B. et al. Utilização do simulador emso no ensino de modelagem e simulação de processos. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiania**, v. 8, n. 14, 2012.
- CASTRO, S. S. **Avaliação Experimental e Modelagem da Elevação do Ponto de Ebulição do Leite Adicionado de Sacarose**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2006.
- CHAWANKUL, N. et al. Simulation of an agitated thin film evaporator for concentrating orange juice using aspenplus. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 247–253, 2001.
- CITRUSBR. Estimativa da produção de suco de laranja concentrado. **Hortifruti Brasil**, 2014.
- CRAPISTE, G. H.; LOZANO, J. E. Effect of concentration and pressure on the boiling point rise of apple juice and related sugar solutions. **Journal of food science**, v. 53, n. 3, p. 865–895, 1988.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos - Princípios e Prática**. 2. ed. São Paulo: Artmed, 2006.
- FILHO, V. G. V. **Tecnologia de Bebidas: Matéria prima, processamento, bpf/appcc, legislação e mercado**. [S.l.]: Edgard Blucher, 2005.
- FOUST, A. S. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- GALINA, C. **Produção de Leite Condensado** — Universidade Regional de Blumenau, Blumenau - SC, 2010.
- GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia de Alimentos**. [S.l.]: NBL Editora, 2008.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agronegócios Brasileiro em Números**. 2010. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>>. Acesso em: 23 de Maio de 2014.

- MINTON, P. E. **Handbook of Evaporation Technology**. New Jersey: Noyes Publications, 1986. 390 p.
- MORESI, M.; SPINOSI, M. Engineering factors in the production of concentrated fruit juices. **Journal of food technology**, II, n. 19, p. 519–533, 1984.
- NETO, J. M. C. et al. Análise do comportamento de um evaporador de suco de laranja utilizando um simulador industrial de processos. **Revista Brasileira de Pesquisas em Alimentos, Campo Mourão**, v. 2, n. 1, p. 49–54, jan./jun 2011.
- PEACOCK, S. Predicting physical properties of factory juices and syrups. **International sugar journal**, v. 97, n. 1162, p. 571–577, 1995.
- POLLEY, S. L.; SNYDER, O. P.; KOTNOUR, P. A compilation of thermal properties of foods. **Food Technology**, p. 76–94, 1980.
- RODRIGUES, R. et al. Ensino de cinética e cálculo de reatores químicos utilizando o simulador emso. **XVI Congresso brasileiro de Engenharia Química**, 2006.
- ROGERIO, H. A.; COSTA, A. O. S.; JUNIOR, E. F. C. Aplicações industriais de evaporadores de múltiplo efeito. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiania**, v. 9, n. 16, p. 2815 – 2834, 2013.
- ROMERO, J. et al. Elavation on boiling point of coffee extract. **Brasilian Journal of Chemical Engineeering**, v. 19, 2001.
- SIEWERDT, W. K. **Suco de Laranja Pasteurizado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Regional de Blumenau, Blumenau - SC, 2011.
- SILVA, J. I. S. **Simulação Dinâmica do Processo de Destilação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, Julho 2012.
- SILVA, P. R. S. **Simulação Dinâmica e Otimização de Evaporadores Múltiplos Efeitos em Biorrefinarias**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2013.
- SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1993.
- SMITH, J. M.; Van Ness, H.; ABBOTT, M. **Introdução a Termodinâmica da Engenharia Quí[m]ica**. 7. ed. [S.l.]: LTC, 2007.
- SOARES, R. de P. **Desenvolvimento de um Simulador Genérico de Processos Dinâmicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2003.
- VARSHNEY, N. N.; BARHATE, V. D. Effects of concentration an d vacua on boiling points of juices. **Journal of food technology**, 1978.
- WESTPHLEN, D. L. **Modelagem, Simulação e Otimização de Sistemas de Evaporação**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 1999.
- WISCHRAL, D.; PRAXEDES, M. A.; SANTOS, T. O. Desenvolvimento de simulador computacional para evaporador de suco de laranja. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA. [S.l.], 2009.

Apêndices

APÊNDICE A – MODELOS DA BIBLIOTECA DE EVAPORADORES

A seguir é mostrado o modelo de correntes e o modelo de evaporador na linguagem do EMSO.

Código A.1 – Modelo de corrente de processo.

Model corrente

ATTRIBUTES

```
Pallette = false;
Color = "Blue";
Brief = "Corrente de processo";
```

PARAMETERS

```
TabelaVapor as Plugin(Brief="Tabela de Vapor", Type="water");
```

VARIABLES

```
T as temperatura (Brief = "Temperatura
da corrente");
P as pressao (Brief = "Pressao da
corrente");
F as vazao_mass (Brief = "Vazao massica da
corrente");
h as entalpia (Brief = "Entalpia
massica da corrente");
Brix as positivo (Brief="Brix do Produto");
x_agua as fracao (Brief = "Fracao de
agua contida na corrente");
x_solido as fracao (Brief = "Fracao de
solido contido na corrente");
```

end

Código A.2 – Modelo do evaporador genérico.

Model evaporador

ATTRIBUTES

```
Pallette = true;
Brief = "Evaporador";
Info =
"Evaporador estatico para a industria de alimentos.
";
Icon = "icon/evaporador";
```

PARAMETERS

```

TabelaVapor      as Plugin              (Brief="Tabela de Vapor",
Type="water");
Solucao          as Switcher            (Brief="Tipo de solucao",
Valid=[ "Suco de Laranja", "Suco de Limao", "Suco de Maca", "
Suco de Abacaxi", "Suco de Manga", "Extrato Cafe"],
Default="Suco de
Laranja");
Gconst           as aceleracao          (Brief="Aceleracao da
Gravidade", Default=9.81, Hidden=true);
Tk              as temp_delta           (Brief="
Adimensionalizacao da temperatura", Default=1, Hidden=true);
EPE_OPCAO        as Switcher            (Brief="Elevacao do Ponto de
Ebulicao Flag", Valid=[ "Calcular", "Desconsiderar"], Default="
Calcular");

```

SET

```

Gconst          = 9.81 * 'm/(s^2)';
Tk              = 1 * 'K';

```

VARIABLES

```

P              as pressao                (Brief="Pressao no
Evaporador");
Brix           as positivo                (Brief="Brix do Produto");
U             as coef_trans               (Brief="Coeficiente
Global de Troca Termica", Protected=false);

A             as area                    (Brief="Area de
Transferencia de Calor");
T             as temperatura              (Brief="Temperatura no
Evaporador", Protected=true);
Q             as potencia                 (Brief="Taxa de Calor"
, Protected=true);
EPE           as temp_delta               (Brief="Elevacao do Ponto de
Ebulicao Devido a Concentracao", Lower=0, Protected=true);
DT            as temp_delta               (Brief="Diferenca de
Temperatura", Lower=0, Protected=true);
Tagua_Sat     as temperatura              (Brief="Temperatura de
Saturacao da Agua Pura", Protected=true);
Economia      as positivo                 (Brief="Economia de Vapor",
Protected=true);
Consumo       as vazao_mass               (Brief="Consumo de Vapor",
Protected=true);

in EntradaVapor      as correnteVapor    (PosX=0, PosY=0.8,
Protected=true);

```

```

in Alimentacao          as corrente      (PosX=0, PosY
    =0.48, Protected=true);
out SaidaCondensado      as condensado    (PosX=0.5, PosY=1,
    Protected=true, Color = "Blue");
out SaidaConcentrado     as corrente      (PosX=1, PosY=0.48,
    Protected=true, Color = "Blue");
out SaidaEvaporado       as vapor         (PosX=0.5, PosY
    =0, Protected=true, Color = "Red");

```

EQUATIONS

```
switch EPE_OP CAO
```

```
case "Calcular":
```

```
switch Solucao
```

```
case "Suco de Laranja":
```

```

EPE = (3.2 * SaidaConcentrado.x_solido - 2.42 * SaidaConcentrado
    .x_solido^2 + 14 * SaidaConcentrado.x_solido^3)*'K';

```

```
case "Suco de Limao":
```

```

EPE = ((0.031) * (100 * SaidaConcentrado.x_solido) ^ (1.5355) *
    exp(-0.0052 * 100 * SaidaConcentrado.x_solido) * (P/'kPa' ) ^
    (-0.2064))*'K';

```

```
case "Suco de Maca":
```

```

EPE = ((0.013602) * (100 * SaidaConcentrado.x_solido) ^ (0.7489)
    * exp(0.0339 * 100 * SaidaConcentrado.x_solido) * (P/'kPa' )
    ^ 0.1054))*'K';

```

```
case "Suco de Abacaxi":
```

```

EPE = ((0.0411) * (100 * SaidaConcentrado.x_solido) ^ (1.4211) *
    exp(-0.00745 * 100 * SaidaConcentrado.x_solido) * (P/'kPa' ) ^
    (-0.0524))*'K';

```

```
case "Suco de Manga":
```

```

EPE = ((0.0577) * (100 * SaidaConcentrado.x_solido) ^ (1.4338) *
    exp(-0.00847 * 100 * SaidaConcentrado.x_solido) * (P/'kPa' )
    ^ (-0.1254))*'K';

```

```
case "Extrato Cafe":
```

```

EPE = ((0.8474E-2) * (100*SaidaConcentrado.x_solido) ^ (0.9895)
      * exp(2.570E-2 *100* SaidaConcentrado.x_solido) * (P/'kPa' ) ^
      (0.1163))*'K';

end

case "Desconsiderar":

  "Elevacao do Ponto de Ebulicao Devido a Concentracao"
  EPE = 0*'K';

end

switch Solucao

  case "Suco de Laranja":

    SaidaConcentrado.h = (4.186-2.679*SaidaConcentrado.x_solido)*(T/
      Tk-273.15)* 'kJ/kg';

  case "Suco de Limao":

    SaidaConcentrado.h = (4.187 - 3.15 * SaidaConcentrado.x_solido)
      * (T/Tk-273.15)* 'kJ/kg';

  case "Suco de Maca":

    SaidaConcentrado.h = (4.187 - 2.788 * SaidaConcentrado.x_solido)
      * (T/Tk-273.15)* 'kJ/kg';

  case "Suco de Abacaxi":

    SaidaConcentrado.h = (4.187 - 3.380 * SaidaConcentrado.x_solido)
      * (T/Tk-273.15)* 'kJ/kg';

  case "Suco de Manga":

    SaidaConcentrado.h = (4.187 - 5.960 * SaidaConcentrado.x_solido)
      * (T/Tk-273.15)* 'kJ/kg';

  case "Extrato Cafe":

    SaidaConcentrado.h = (((T/Tk-273.15)) * (1549 * SaidaConcentrado
      .x_solido + 4176 * (1 - SaidaConcentrado.x_solido)) + 0.5 *
      ((T/Tk-273.15)^2) * (1.96 *SaidaConcentrado.x_solido- 0.0909
      * (1 - SaidaConcentrado.x_solido))

```

```
+ ((T/Tk-273.15)^3/3) * (-0.00549 * SaidaConcentrado.x_solido +  
0.00547 * (1 - SaidaConcentrado.x_solido)))* 'J/kg';
```

end

"Temperatura de Saturacao da Agua Pura"

```
Tagua_Sat = TabelaVapor.Tsat(P);
```

"Economia de Vapor"

```
Economia = SaidaEvaporado.F/EntradaVapor.F;
```

"Consumo de Vapor"

```
Consumo = SaidaEvaporado.F;
```

"Temperatura de equilibrio no Evaporador"

```
T = EPE + Tagua_Sat;
```

"Temperatura de Equilibrio - Concentrado"

```
SaidaConcentrado.T = T;
```

"Temperatura de Equilibrio - Evaporado"

```
SaidaEvaporado.T = T;
```

"Pressao de Equilibrio - Evaporado"

```
SaidaEvaporado.P = P;
```

"Pressao de Equilibrio - Concentrado"

```
SaidaConcentrado.P = P;
```

"Temperatura do Condensado"

```
SaidaCondensado.P = EntradaVapor.P;
```

"Vazao do Condensado"

```
SaidaCondensado.F = EntradaVapor.F;
```

"Brix do Produto"

```
SaidaConcentrado.x_solido*100 = Brix;
```

"Brix"

```
SaidaConcentrado.Brix = Brix;
```

"Balanço de Massa Global"

```
Alimentacao.F = SaidaConcentrado.F + SaidaEvaporado.F;
```

"Balanço de Massa no Solido"

```
Alimentacao.F*Alimentacao.x_solido = SaidaConcentrado.F*  
SaidaConcentrado.x_solido;
```

"Restricao do Balanco de Massa"

SaidaConcentrado.x_agua + SaidaConcentrado.x_solido = 1;

"Taxa de Calor"

$Q = U \cdot A \cdot DT;$

"Balanco de Energia no Trocador"

$Q = \text{EntradaVapor}.F \cdot (\text{EntradaVapor}.h - \text{SaidaCondensado}.h);$

"Diferenca de Temperaturas"

$DT = \text{EntradaVapor}.T - T;$

"Balanco de Energia no Evaporador"

$Q + \text{Alimentacao}.F \cdot \text{Alimentacao}.h =$

$\text{SaidaConcentrado}.F \cdot \text{SaidaConcentrado}.h + \text{SaidaEvaporado}.F \cdot \text{SaidaEvaporado}.h;$

end
